



TUGAS AKHIR - TL141584

**PENGARUH TEMPERATUR *SOLUTION*
TREATMENT DAN *AGING* TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN
*COPPERIZED-AISI 1006***

WIDIA ANGGIA VICKY
NRP. 2712 100 007

Dosen Pembimbing
Sutarsis, S.T., M.Sc.
Hariyati P., S.Si., M.Si.

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016



FINAL PROJECT - TL141584

**EFFECTS OF SOLUTION TREATMENT AND
AGING TEMPERATURE ON
MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF
*COPPERIZED-AISI 1006***

WIDIA ANGGIA VICKY
NRP. 2712 100 007

Advisor
Sutarsis, S.T., M.Sc.
Hariyati P., S.Si., M.Si

Materials and Metallurgical Engineering Department
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2016

**PENGARUH TEMPERATUR *SOLUTION TREATMENT*
DAN AGING TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN
KEKERASAN *COPPERIZED-AISI 1006***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

WIDIA ANGGIA VICKY

NRP 2712 100 007

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

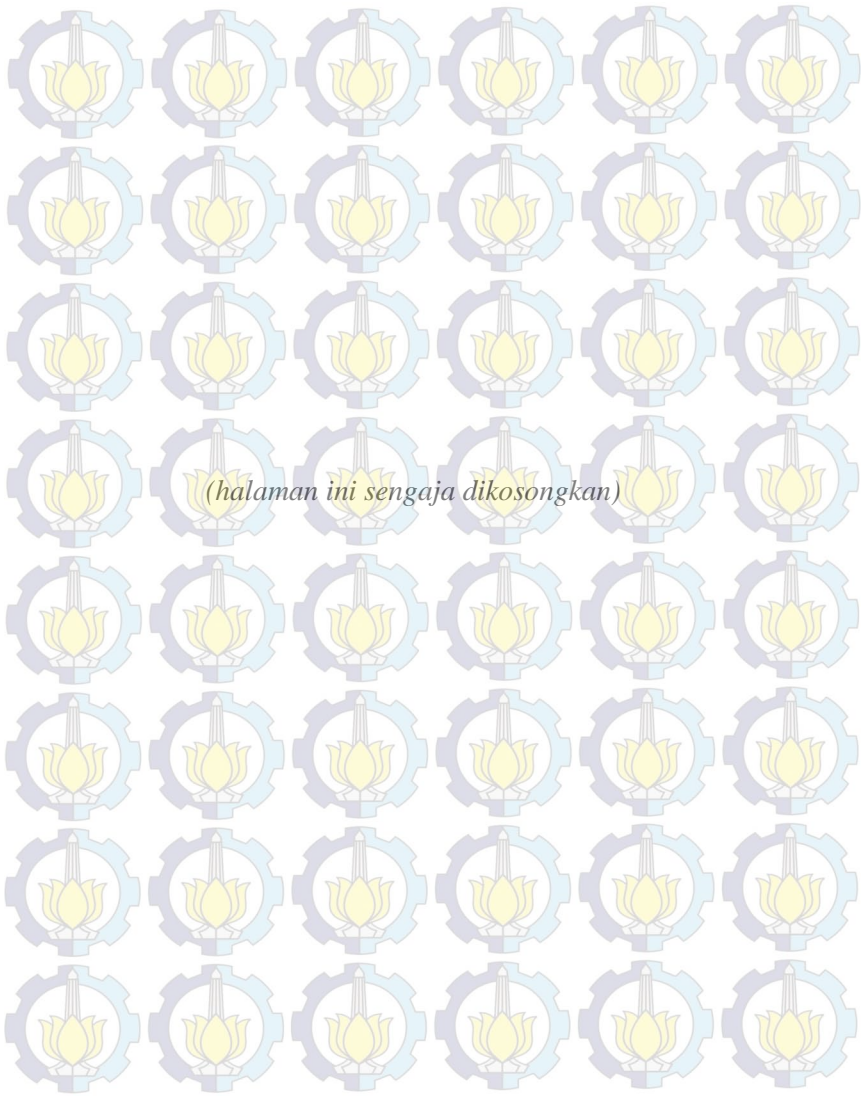
1. Sutarsis, S.T., M.Sc.

..... (Pembimbing 1)

2. Hariyati P., S.Si., M.Si.

..... (Pembimbing 2)





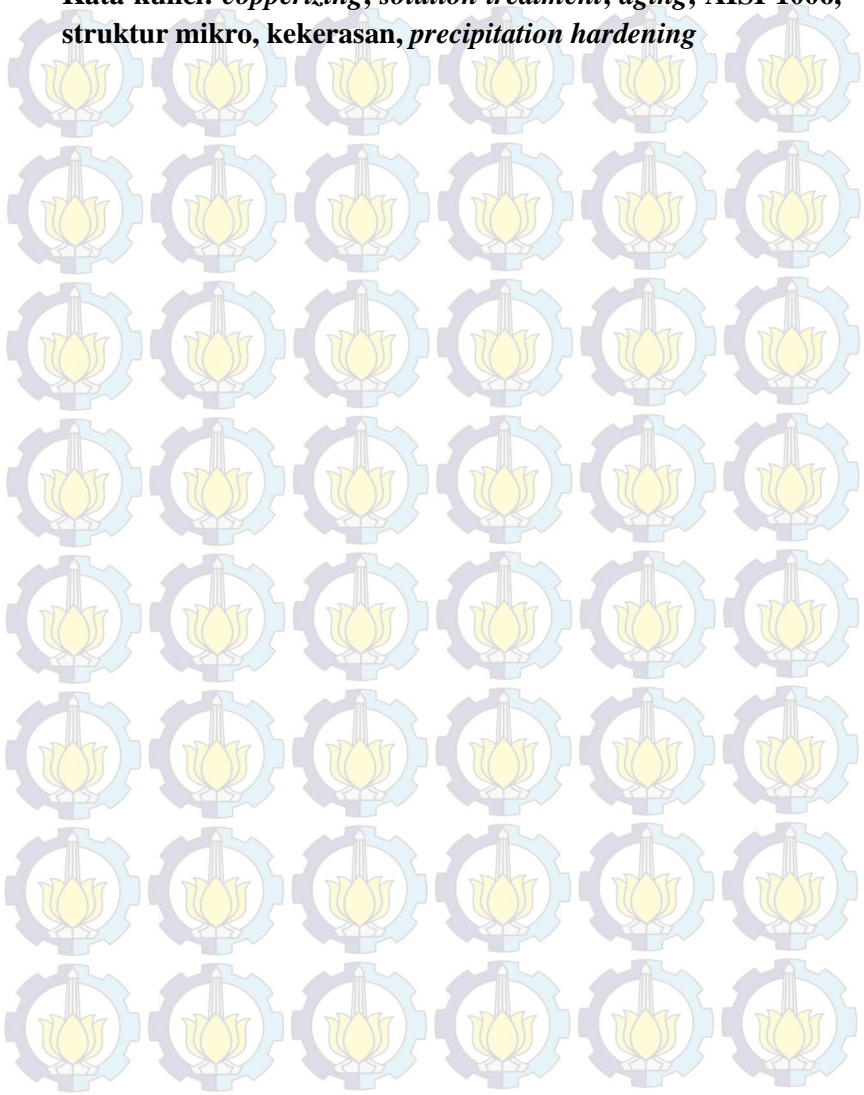
PENGARUH TEMPERATUR *SOLUTION TREATMENT* DAN AGING TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN KEKERASAN *COPPERIZED-AISI 1006*

Nama Mahasiswa : Widia Anggia Vicky
NRP : 2712100007
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Sutarsis, ST., M.Sc.
Co-Pembimbing : Hariyati P., S.Si., M.Si.

Abstrak

Sebagai salah satu unsur paduan yang digunakan pada baja karbon rendah, tembaga dapat meningkatkan kekuatan tanpa menurunkan keuletan secara signifikan. Tembaga meningkatkan kekuatan pada baja dengan mekanisme penguatan secara precipitation hardening. Pemaduan tembaga dan baja AISI 1006 pada penelitian ini dilakukan dengan mencelupkan baja AISI 1006 yang telah di-pre-heat ke dalam tembaga cair. Selanjutnya dilakukan precipitation hardening dengan variasi pada temperatur solution treatment dan aging. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa temperatur solution treatment dan aging tidak mempengaruhi fasa yang terbentuk pada copperized-AISI 1006, yaitu tetap berupa α -ferit. Kenaikan temperatur solution treatment sebanding dengan kenaikan diameter rata-rata butir copperized-AISI 1006 yang berpengaruh terhadap turunnya nilai kekerasan. Sementara itu, temperatur aging 450°C menghasilkan diameter butir rata-rata paling kecil dibanding temperatur aging yang lain, yaitu sebesar 49,23 μm dan 50,26 μm untuk sampel yang sebelumnya di-solution treatment 800 dan 900°C. Sebagai akibatnya, copperized-AISI 1006 dengan temperatur aging 450°C menghasilkan kekerasan tertinggi dibanding temperatur aging yang lain, yaitu 119, 47 VHN dan 115,75 VHN untuk sampel yang sebelumnya di-solution treatment 800 dan 900°C.

Kata kunci: *copperizing, solution treatment, aging, AISI 1006, struktur mikro, kekerasan, precipitation hardening*



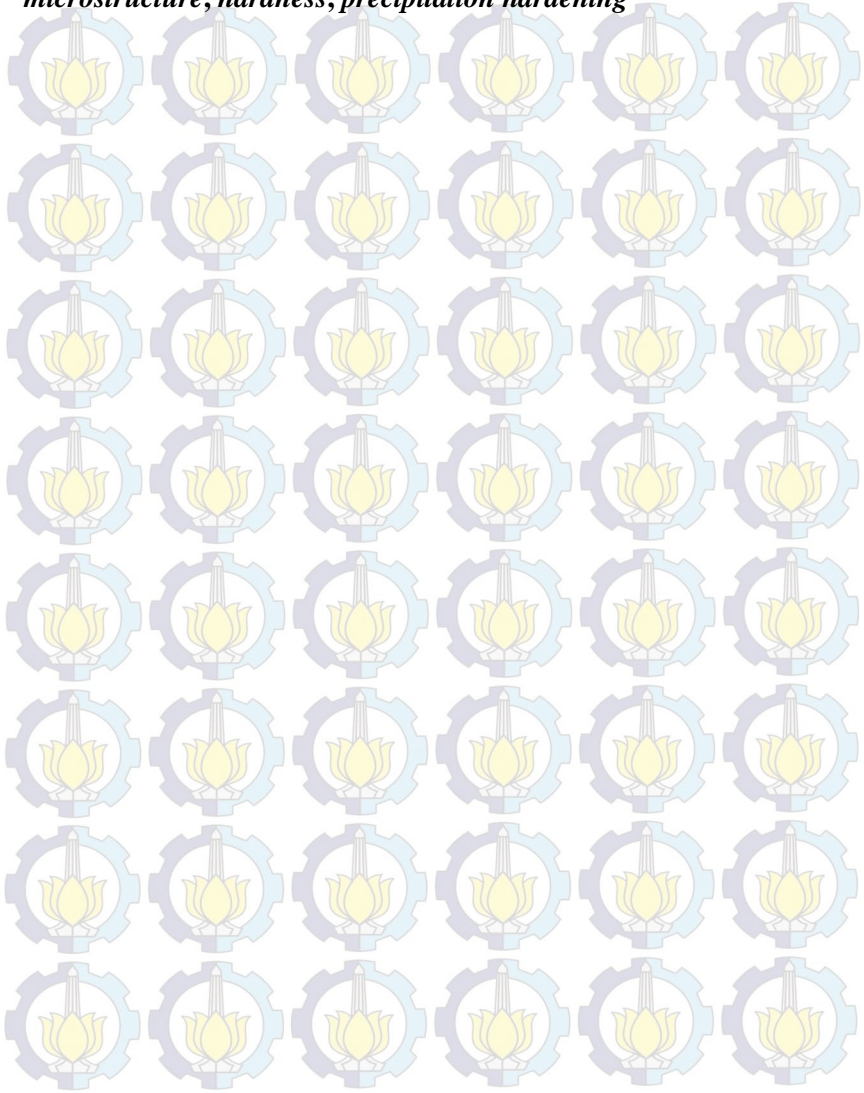
EFFECTS OF SOLUTION TREATMENT AND AGING TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE AND HARDNESS OF COPPERIZED-AISI 1006

Name : Widia Anggia Vicky
NRP : 2712100007
Department : Teknik Material dan Metalurgi
Advisor : Sutarsis, ST., M.Sc.
Co-Advisor : Hariyati P., S.Si., M.Si.

Abstract

As one of the alloying elements used in low carbon steel, copper can increase the strength of steel without lowering its ductility significantly. Copper increases the strength of steel by precipitation hardening. In this research, copper and AISI 1006 steel were alloyed by immersing the pre-heated steel into molten copper. After the immersion process, the precipitation hardening was performed with variations in temperature of solution treatment and aging. From the results of this study, it was found that the solution treatment temperature did not affect the phase of copperized-AISI 1006, but the aging process affected the formation of secondary phase. The increase of solution treatment temperature is proportional to the increase of copperized-AISI 1006 average grain diameter. In contrast, the use of aging temperature of 450°C obtained the smallest average grain diameter than others, in the amount of 49,23 μm and 50,26 μm for sample that previously being solution treatment at 800 and 900°C. Besides, the increase of the solution treatment temperature is inversely proportional to the hardness number of copperized-AISI 1006. However, the aging temperature of 450°C obtained the highest hardness number than other aging temperature, in the amount of 119,47 VHN and 115,75 VHN for sample that previously being solution treatment at 800 and 900°C.

Keyword: *copperizing, solution treatment, aging, AISI 1006, microstructure, hardness, precipitation hardening*



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala anugerah dan karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Pengaruh Temperatur *Solution Treatment* dan Aging terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan *Copperized-AISI 1006*”**.

Laporan tugas akhir ini disusun untuk memenuhi syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada :

1. Allah SWT atas nikmat serta anugerah-Nya kepada penulis;
2. Orang tua dan keluarga penulis yang selalu mendoakan dan menyemangati serta memberikan dukungan;
3. Bapak Sutarsis S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing Tugas Akhir dan dosen wali;
4. Ibu Hariyati P., S.Si., M.Si. selaku co-pembimbing Tugas Akhir;
5. Bapak Dr. Agung Purniawan, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS;
6. Tim Dosen Penguji seminar dan sidang, serta seluruh dosen dan staff Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS;
7. Kepada para petugas dan karyawan Laboratorium Metalurgi dan Laboratorium Karakterisasi Material.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan, tetapi besar harapan penulis tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Januari 2016

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN MUKA	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Baja AISI 1006.....	5
2.2 HSLA (<i>High-Strength Low Alloy</i>).....	7
2.3 Tembaga	8
2.4 Pengaruh Tembaga dalam Baja.....	9
2.5 Difusi.....	11
2.6 <i>Precipitation Hardening</i>	13
2.7 <i>Hot Dip Coating</i>	15
2.8 <i>Carburizing</i>	16
2.9 <i>Nitriding</i>	17
2.10 <i>Furnace Brazing</i>	17
2.11 <i>Copper Clad Steel Wire</i>	19
2.12 Penelitian Sebelumnya	20
BAB III METODOLOGI	
3.1 Diagram Alir	31

3.2 Alat dan Bahan Penelitian	32
3.3 Prosedur Penelitian.....	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Hasil Pengamatan Makro.....	39
4.2 Hasil Pengujian <i>Optical Emission Spectroscopy</i> (OES)....	41
4.3 Hasil Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	41
4.4 Hasil Uji Metalografi.....	47
4.5 Hasil Uji Kekerasan.....	52
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN.....	61
BIODATA PENULIS.....	85
UCAPAN TERIMA KASIH.....	87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C	5
Gambar 2.2 Diagram Fasa Fe-Cu	10
Gambar 2.3 Difusi pada Tembaga-Nikel Sebelum Perlakuan Panas.....	12
Gambar 2.4 Difusi Tembaga-Nikel Setelah Perlakuan Panas....	12
Gambar 2.5 Mekanisme (a) difusi vakansi (b) difusi intersisi ..	13
Gambar 2.6 Kelarutan karbon dalam besi α	14
Gambar 2.7 Hot-dip coating	16
Gambar 2.8 Furnace untuk Proses Brazing.....	18
Gambar 2.9 (a) Difusi Tembaga ke dalam Baja Sepanjang Batas Butir (b) Citra X-ray dari Daerah Pertemuan Antara Tembaga dan Baja.....	18
Gambar 2.10 Fasa Logam Cair yang Terjebak di antara Batas Butir.....	19
Gambar 2.11 Proses <i>Copper Clad Steel Wire</i>	20
Gambar 2.12 Skema Tiga Tahap Perlakuan Panas	21
Gambar 2.13 Fraksi Volume Fasa Sampel	22
Gambar 2.14 (a) Hasil TEM Austenit Sisa (b) Hasil EDS pada Fasa.....	22
Gambar 2.15 Hasil Uji Kekerasan	23
Gambar 2.16 Hasil OTAP.....	24
Gambar 2.17 Variasi Temperatur <i>Aging</i> terhadap Kekerasan HSLA-100	25
Gambar 2.18 Mikrograf TEM Baja <i>Water-Quench</i>	26
Gambar 2.19 Perilaku <i>aging</i> dari HSLA Copper-Bearing Steels	27
Gambar 2.20 Struktur Mikro Baja Hasil Aging (a,b,c) dan Deformasi Dingin(d,e,f)	28

Gambar 2.21 Perubahan Kekuatan Paduan Fe-1,18% Cu Selama Aging pada 600°C	29
Gambar 4.1 Penampang Melintang (a) <i>Copperized</i> -AISI 1006 dan <i>Solution treatment</i>	39
Gambar 4.2 Penampang Melintang Sampel <i>Solution treatment</i> 800°C dengan Aging (a)400°C, (b) 450°C, (c) 500°C, dan <i>Solution treatment</i> 900°C dengan Aging (d)400°C, (e) 450°C, dan (f) 500°C	40
Gambar 4.3 Grafik Hasil XRD Baja AISI 1006	42
Gambar 4.4 Grafik Hasil XRD <i>Copperized</i> -AISI 1006	43
Gambar 4.5 Hasil XRD Baja AISI 1006, <i>Copperized</i> -AISI 1006, dan Sampel <i>Solution Treatment</i>	44
Gambar 4.6 Hasil XRD Sampel <i>Solution Treatment</i> 800°C tanpa Aging dan dengan Aging 400, 450, 500°C	46
Gambar 4.7 Hasil XRD Sampel <i>Solution Treatment</i> 900°C tanpa Aging dan dengan Aging 400, 450, 500°C	47
Gambar 4.7 Struktur Mikro Perbesaran 500x (a) Baja AISI 1006, (b) <i>Copperized</i> -AISI 1006 (b), dan <i>Solution Treatment</i>	48
Gambar 4.8 Diameter Rata-rata Butir Baja AISI 1006, <i>Copperized</i> -AISI 1006, dan Sampel <i>Solution Treatment</i>	49
Gambar 4.9 Struktur Mikro Perbesaran 500x	51
Gambar 4.10 Diameter Rata-rata Butir Sampel <i>Solution Treatment</i> dan Aging pada Berbagai Variasi Temperatur	52
Gambar 4.11 Nilai Kekerasan Baja AISI 1006, <i>copperized</i> -AISI 1006, dan Sampel <i>Solution Treatment</i>	53
Gambar 4.12 Nilai Kekerasan Sampel Aging	54

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja AISI 1006.....	7
Tabel 2.2 Penggunaan Sifat-Sifat Tembaga	8
Tabel 2.3 Penggunaan dari Tembaga.....	9
Tabel 2.4 Komposisi sampel HSLA-100	25
Tabel 2.5 Komposisi Kimia Sampel Uji (wt%).....	28
Tabel 3.1 Rancangan Percobaan	36
Tabel 4.1 Hasil OES Baja AISI 1006 dan <i>Copperized</i> -AISI 1006	41
Tabel 4.2 Hasil XRD Baja AISI 1006 dan <i>Copperized</i> -AISI 1006	44



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini tembaga menjadi salah satu material yang berkembang pesat dan banyak digunakan sebagai logam berat *non-ferrous* (Habashi, 1997). Tembaga banyak digunakan karena memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, ketahanan korosi yang baik, mudah difabrikasi, serta memiliki kekuatan dan ketahanan *fatigue* yang baik (ASM Handbook vol 2, 1992). Tembaga murni sifatnya lunak dengan permukaan berwarna jingga kemerahan, sehingga untuk diaplikasikan secara langsung sebagai tembaga murni kurang baik. Sehingga tembaga sering kali dijadikan logam paduan untuk meningkatkan nilai propertiesnya (Davenport, 2002).

Pada umumnya tembaga dipadukan dengan timah, sehingga didapat paduan yang dikenal dengan sebutan perunggu. Selain itu tembaga juga sering dipadukan dengan seng untuk menghasilkan kuningan. Keuntungan dari paduan-paduan ini akan meningkatkan sifat mekanik dari tembaga itu sendiri. Namun, selain dengan kedua unsur diatas tembaga juga dipadukan dengan baja selaku logam yang umum penggunaannya. Penggunaan tembaga dalam pepaduan ini dapat meningkatkan kekuatan, namun mempertahankan keuletannya, berbeda dengan karbida dan nitrida (Takaki dkk, 2004). Penurunan keuletan pada baja ini umumnya terjadi pada metode pengerasan yang biasa dilakukan, yaitu penambahan karbon (*carburising*) atau pun penambahan nitrogen (*nitriding*) (Suherman, 2003). Akan tetapi, dengan penambahan unsur tembaga di dalam baja sebagai paduan akan menurunkan sifat mekaniknya apabila kadarnya tidak dikontrol (Sekuwono, 2014).

Proses pepaduan tembaga pada baja biasa dijumpai pada pembuatan kawat listrik. Metode yang digunakan pada proses manufakturnya adalah *copper clad steel*. Metode kedua yang biasa dilakukan untuk pepaduan tembaga pada baja adalah



metode *furnace brazing*. Pada metode ini memanfaatkan tekanan sekaligus juga pemanasan yang dilakukan bersamaan (Molleda, 2007). Selain itu pada berbagai penelitian yang ada digunakan metode peleburan tembaga dan baja bersama-sama dan dilakukan pengecoran.

Pada penelitian ini akan dilakukan metode pematuan baja dengan tembaga dengan mengadopsi metode *hot-dip coating*, yakni dengan mencelupkan baja yang telah di-*preheat* ke dalam tembaga cair. Metode ini selanjutnya akan disebut dengan *copperizing*. Setelah proses *copperizing* akan dilanjutkan dengan *presipitation hardening* yang terdiri dari *solution treatment* dan *aging*. Pengaruh dari variasi temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap struktur mikro dan kekerasan *copperized-AISI 1006* akan dianalisis lebih lanjut dengan berbagai pengujian.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap struktur mikro *copperized-AISI 1006*?
2. Bagaimana pengaruh temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap perubahan fasa *copperized-AISI 1006*?
3. Bagaimana pengaruh temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap kekerasan *copperized-AISI 1006*?

1.3 Batasan Masalah

Agar diperoleh hasil sesuai dengan yang diinginkan dan tidak menyimpang dari tujuan penelitian, maka dibuat batasan masalah sebagai berikut

1. Pengaruh lingkungan sekitar proses *copperizing* diabaikan
2. Waktu tahan ketika *pre-heat* dianggap sama
3. Temperatur ketika pengangkatan substrat dan pencelupan dianggap konstan
4. Tembaga dianggap leleh sempurna dan temperturnya konstan
5. Kecepatan pendinginan dianggap konstan



1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah

1. Menganalisis pengaruh temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap struktur mikro *copperized-AISI 1006*.
2. Menganalisis pengaruh temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap perubahan fasa *copperized-AISI 1006*.
3. Menganalisis pengaruh temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap kekerasan *copperized-AISI 1006*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat untuk memberikan informasi tentang metode alternatif pemaduan baja dengan tembaga serta pengaruh dari temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap struktur mikro, perubahan fasa, dan kekerasan *copperized-AISI 1006*.

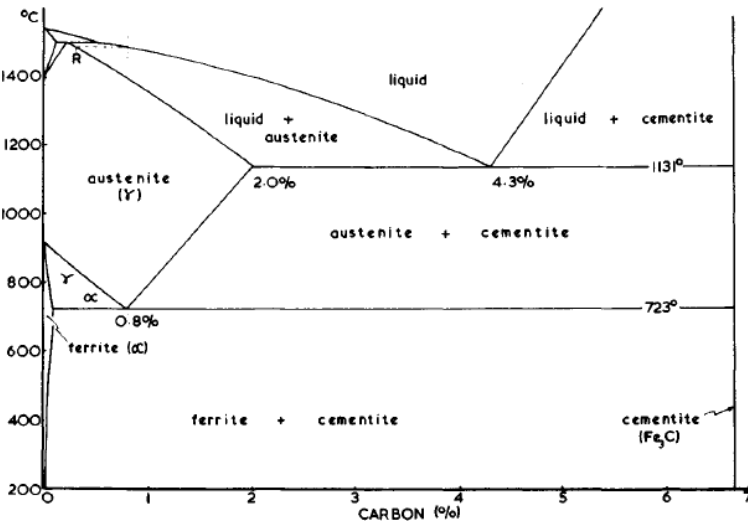


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja AISI 1006

Berdasarkan diagram fasa besi-karbon, semua paduan biner dari Fe-C yang mengandung karbon kurang dari 2% digolongkan sebagai baja, dan paduan dengan jumlah karbon yang lebih tinggi termasuk besi cor. Baja adalah material yang banyak digunakan dalam dunia teknik karena (1) jumlah dari besi yang melimpah di bumi, (2) temperatur leleh dari besi cukup tinggi (1534°C), (3) memiliki sifat mekanik yang baik, seperti nilai *yield strength* yang cukup (200-300 Mpa) dengan keuletan yang tinggi dan ketangguhan mencapai 100 MPa/m^2 , dan (4) memiliki struktur mikro yang berbeda dengan transformasi *solid-state* melalui variasi pendinginan dari kondisi austenit (Totten, 2006)



Gambar 2.1 Diagram Fasa Fe-Fe₃C (Higgins, 1993)



Menurut komposisi kimianya baja dapat dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu baja karbon (baja tanpa paduan, *plain carbon steel*) dan baja paduan. Baja karbon masih mengandung sejumlah unsur lain, tetapi masih dalam batas-batas tertentu yang tidak banyak berpengaruh terhadap sifatnya (Bondan. 2010). Dari diagram Fe-Fe₃C pada Gambar 2.1 dapat dilihat klasifikasi baja karbon berdasarkan kandungan karbon yang dimiliki pada baja tersebut.

Baja karbon rendah (*low carbon steel*) memiliki kadar karbon sampai 0,30%. Produk yang paling banyak dari baja jenis ini berupa lembaran yang umumnya dikerjakan dengan *cold-rolled* dan *annealing* (ASM Handbook vol 1. 1990). Pemakaiannya sebagai baja konstruksi umum, profil rangka bangunan, baja tulangan beton, rangka kendaraan, mur-baut, pelat, pipa, dan lain-lain. Strukturnya terdiri dari ferit dan sedikit perlit, sehingga baja ini kekuatannya relatif rendah, lunak, tetapi keuletannya tinggi, mudah dibentuk dan di-*machining*. Baja ini tidak dapat dikeraskan kecuali dengan pengerasan permukaan (Suherman. 1999).

Ada juga yang membagi lagi kelompok ini sebagai *dead mild steel* dengan kadar karbon kurang dari 0,15% yang biasanya digunakan sebagai baja lembaran, besi beton, besi strip, dan lain-lain (Suherman. 1999). Kelompok lain dari baja karbon rendah adalah baja paduan rendah berkekuatan tinggi atau yang dikenal juga sebagai baja HSLA (*High Strength-Low Alloy*). Kelompok baja ini mengandung unsur paduan seperti tembaga, vanadium, nikel, dan molybdenum yang totalnya dapat mencapai 10%. Kekuatannya jauh lebih tinggi daripada baja karbon rendah biasa. Kekuatannya dapat mencapai 480 MPa dan umumnya lebih tahan korosi. Aplikasi baja HSLA seperti jembatan, menara, pressure vessel, dan lain-lain (Bondan. 2010).

Baja AISI 1006 merupakan baja karbon sangat rendah yang biasa digunakan karena memiliki keuletan tinggi dan mampu mesin yang baik. Kadar komposisi baja AISI 1006 seperti dituliskan dalam ASTM A830-A830M dapat dilihat pada Tabel



2.1. Dalam proses pembuatannya baja ini melibatkan proses *rolling*, karena sifatnya tersebut. Baja ini tergolong baja karbon sangat rendah karena kadar karbon yang terkandung maksimum 0,08 wt.% untuk segala bentuk baja AISI 1006.

Tabel 2.1 Komposisi Kimia Baja AISI 1006 (ASTM. 2003)

Unsur	wt. %
Karbon, C	Maks 0,08
Mangan, Mn	Maks 0,45
Fosfor, P	Maks 0,035
Sulfur, S	Maks 0,04

2.2 HSLA (*High-Strength Low Alloy*)

High-Strength Low Alloy (HSLA) atau baja *microalloy* didesain untuk mendapatkan sifat mekanik yang lebih baik daripada baja karbon konvensional. Baja HSLA tidak dibuat untuk menjadi baja paduan seperti pada umumnya, tetapi memang sengaja didesain untuk sifat mekanik yang lebih spesifik (HSLA memiliki kekuatan luluh lebih dari 275 Mpa atau 40 ksi). Komposisi kimia dari HSLA secara spesifik bisa berbeda-beda tergantung dari sifat mekanik yang ingin dicapai. Baja HSLA dalam bentuk lembaran atau plat memiliki kadar karbon yang rendah (0,05-0,25% C) agar dapat diperoleh sifat mampu dibentuk dan mampu las yang baik, dan memiliki kadar Mn mencapai 2% (ASM Handbook vol 1. 2001).

Baja HSLA terdiri dari berbagai standar dan sifat yang didesain khusus untuk kombinasi sifat mekanik tertentu, seperti kekuatan, ketangguhan, sifat mampu bentuk, sifat mampu las, dan ketahanan korosi pada atmosfer. Baja ini tidak sama dengan baja paduan, karena meskipun ada tambahan unsur paduan tetapi jumlahnya sangat sedikit. Baja HSLA banyak diaplikasikan untuk pipa-pipa pada perisahan minyak dan gas, kendaraan *off-road*, jalan raya, konstruksi, peralatan industri, tangki penyimpanan, dan lain-lain (ASM Handbook vol 1. 2001).



2.3 Tembaga

Tembaga sebagai logam berwarna merah yang terpisah dari emas dengan warna yang berbeda dari bagian lain yang berwarna abu-abu, sudah dikenal sejak lama oleh manusia. Pada saat ini menjadi salah satu material yang berkembang pesat dan banyak digunakan sebagai logam berat *non-ferrous* (Habashi, 1997). Tembaga banyak digunakan karena memiliki konduktivitas listrik dan panas yang baik, ketahanan korosi yang baik, mudah difabrikasi, serta memiliki kekuatan dan ketahanan *fatigue* yang baik. Secara umum merupakan material non-magnetik. Dapat di-solder dan di-brazing, dan banyak tembaga dan paduannya yang dapat dilas dengan berbagai macam gas, *arc*, atau metode lain. Paduan tembaga dapat dipolish, dilapisi atau di-coating dengan bahan organik atau kimia sebagai langkah akhir dalam fabrikasi (ASM Handbook vol 2. 1992).

Tembaga murni umumnya digunakan sebagai kabel, kawat, dan berbagai produk penghantar listrik. Tembaga, perunggu, kuningan, dan *cupronickels* banyak diaplikasikan pada radiator kendaraan, *heat exchanger*, sistem pemanas, panel dari *solar cell*, dan berbagai aplikasi penghantar panas. Karena memiliki ketahanan korosi yang baik, tembaga banyak dipakai sebagai bahan pipa, katup, dan berbagai produk yang mengalirkan fluida (ASM Handbook vol 2. 1992). Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 di bawah menunjukkan penggunaan dari sifat dan aplikasi tembaga.

Tabel 2.2 Penggunaan Sifat-Sifat Tembaga (Davenport. 2002)

No	Sifat yang dimanfaatkan	% dari penggunaan total
1.	Konduktifitas listrik	61
2.	Ketahanan korosi	20
3.	Konduktifitas termal	11
4.	Sifat mekanik dan struktural	6
5.	Seni	2

**Tabel 2.3** Penggunaan dari Tembaga (Davenport. 2002)

No.	Aplikasi	% dari penggunaan total
1.	Konstruksi bangunan	40
2.	Produk-produk elektronik	25
3.	Mesin dan peralatan industry	14
4.	Peralatan transportasi	11
5.	Barang-barang konsumen	10

2.4 Pengaruh Tembaga dalam Baja

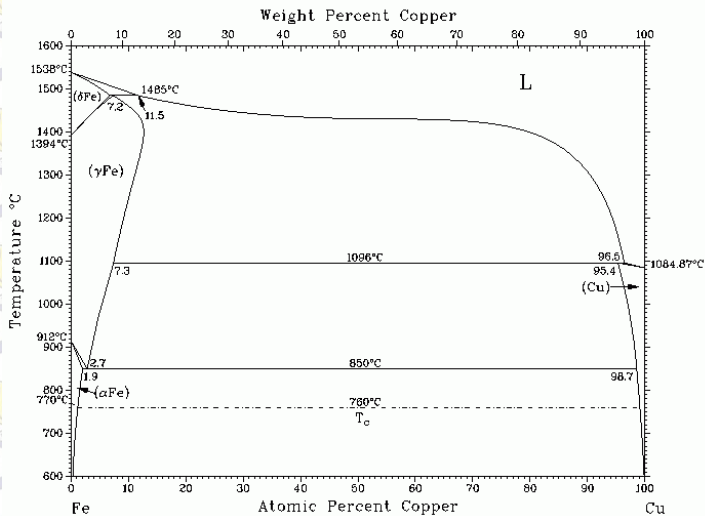
Tembaga dalam baja diketahui menyebabkan pengerasan presipitasi (*precipitation hardening*) dari baja. Baja *high strength low alloy* (HSLA) dan *stainless steel* diproduksi secara komersial dengan memanfaatkan efek pengerasan presipitasi dari tembaga (Kishida. 1995). Presipitasi dari tembaga dalam besi dan baja merupakan fenomena yang sudah dikenal dan berpotensi memberikan peningkatan kekuatan tetapi juga menstabilkan keuletan, karena efek dari presipitat tembaga secara alami berbeda dengan presipitat lain seperti nitrida dan karbida. Selain itu, penguatan dengan penghalusan butir bisa jadi adalah alasan lain terjadinya peningkatan kekuatan oleh presipitat tembaga (Takaki. 2004).

Presipitasi tembaga terjadi pada saat *aging* akibat kelarutan tembaga yang rendah dalam ferit. Penambahan tembaga dalam baja meningkatkan kekuatan luluh melalui *precipitation strengthening*, dan dapat terus ditingkatkan untuk membentuk presipitat pada kisaran temperatur 500-550°C (Zhou, 2014).

Pada paduan Fe-Cu ada 3 ikatan yang dapat terjadi di dalamnya. Ikatan tersebut antara lain yang pertama adalah difusi Cu ke dalam batas butir ferit, yang kedua adalah Cu berdifusi ke dalam feritnya itu sendiri, dan yang ketiga adalah Fe berdifusi ke



dalam lapisan Cu (Xu, 1992). Cu yang berdifusi ke dalam baja dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor. Diantaranya adalah kadar karbon dan temperatur pada saat proses pendifusian. Namun salah satu faktor yang memiliki efek yang cukup besar dalam pendifusian Cu ke dalam Fe adalah temperature pada saat proses pendifusian. Sedangkan perbedaan kadar karbon memiliki pengaruh yang tidak terlalu signifikan pada proses pendifusian Cu ke dalam Fe (Rassoul, 1997).



Gambar 2.2 Diagram Fasa Fe-Cu

Tembaga juga memperlihatkan pengaruh yang menarik pada baja lasan. Penambahan tembaga pada material lasan ataupun baja lasan dapat menguatkan presipitasi, yang mana memungkinkan untuk adanya pengurangan kadar karbon dalam logam las. Dengan menurunnya kandungan karbon, dapat meningkatkan kemampuan las baja dan memungkinkan untuk mengurangi adanya pre treatment (Moline, 2010).

Umumnya bentuk penguatan dengan tembaga dilakukan dalam bentuk metalurgi serbuk, karena kelebihanannya dalam sifat

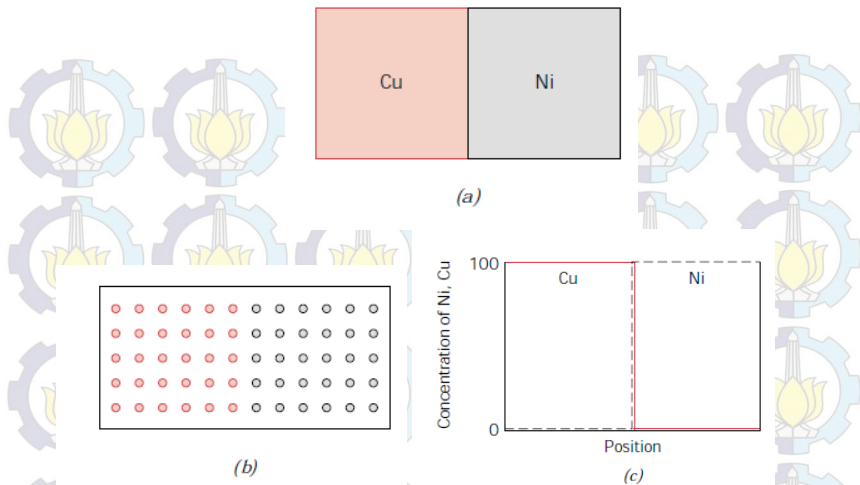


mekanik yang baik, *sinterability*, dan biaya yang cukup bersaing. Namun, tetap harus dengan kontrol dimensi yang ketat (Marucci, dkk. 2011). Kadar Cu dalam baja harus tetap terkontrol dan tidak melebihi batas tertentu karena kecenderungannya untuk distorsi mikrostruktural. Adanya kadar melebihi 0,25 wt% biasanya menghasilkan pembentukan senyawa kompleks dan mengakibatkan distorsi serius pada mikrostruktur baja. Tembaga juga diketahui menjadi penyebab adanya kecacatan permukaan baja karena oksidasi dari permukaan yang kaya tembaga (Sekunowo. 2014).

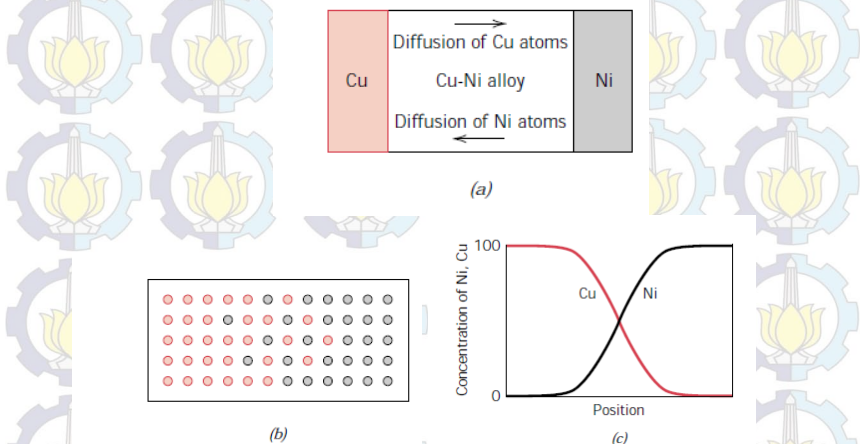
2.5 Difusi

Perlakuan panas biasa dilakukan pada berbagai material untuk memperbaiki sifatnya. Fenomena yang terjadi selama proses perlakuan panas kebanyakan melibatkan difusi atom. Banyak reaksi dan proses yang penting dalam perlakuan material bergantung pada transfer massa dalam solid (biasanya pada level mikroskopis) atau dari *liquid*, gas, atau fasa *solid* lain. Peristiwa ini dikenal sebagai difusi, yaitu proses transfer material yang melibatkan pergerakan atom. Peristiwa difusi dapat dikatakan sebagai *diffusion-couple* yang terjadi pada dua logam berbeda yang disambungkan sehingga kedua sisinya saling bersentuhan (Callister dan Rethwisch. 2010).

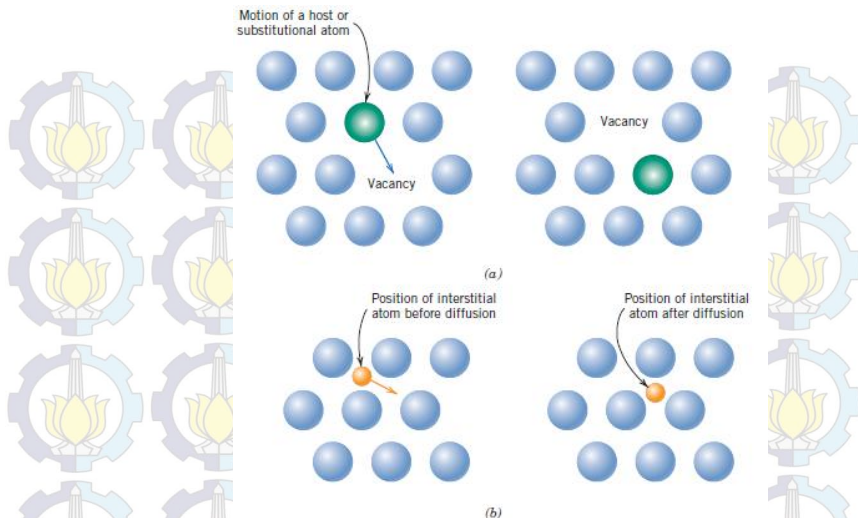
Gambar 2.3 menunjukkan posisi dari atom-atom pada tembaga dan nikel serta konsentrasinya sebelum dilakukan perlakuan panas. Pasangan logam ini lalu dipanaskan selama waktu tertentu pada temperatur di bawah temperatur leleh kedua logam dan didinginkan pada temperatur kamar. Analisis secara kimia menunjukkan atom-atom kedua logam terpisah seperti pada gambar 2.4. konsentrasi dari kedua logam juga mengalami perubahan. Hasil analisis mengindikasikan atom-atom dari tembaga berdifusi ke dalam atom-atom nikel, begitu pula sebaliknya (Callister. 2010).



Gambar 2.3 Difusi pada Tembaga-Nikel Sebelum Perlakuan Panas (Callister. 2010)



Gambar 2.4 Difusi Tembaga-Nikel Setelah Perlakuan Panas (Callister. 2010)



Gambar 2.5 Mekanisme (a) difusi vakansi (b) difusi intersisi (Callister, 2010)

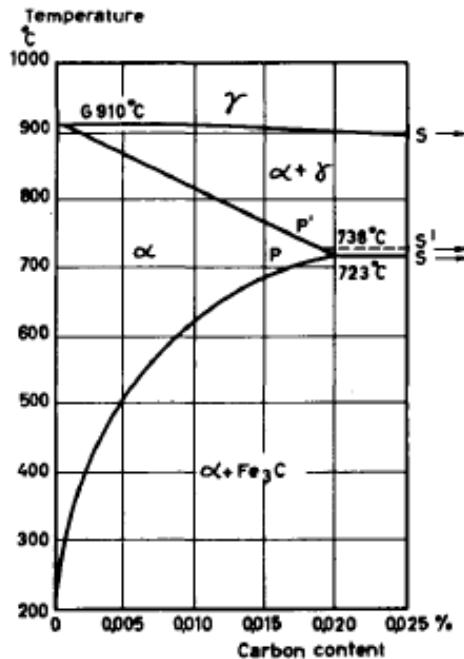
Beberapa model pergerakan atom yang mungkin terjadi adalah difusi vakansi dan intersisi. Difusi vakansi terjadi karena adanya kekosongan pada *lattice* sehingga atom dari *lattice* lain mengisi ruang kosong tersebut. Proses *self-diffusion* dan *interdiffusion* keduanya merupakan difusi vakansi. Tipe difusi yang kedua yaitu difusi intersisi, dimana atom intersisi yang berukuran lebih kecil mengisi ruang kosong di antara atom-atom induk. Mekanisme dua difusi di atas dapat dilihat pada Gambar 2.5 (Callister, 2010).

2.6 Precipitation Hardening

Pengerasan jenis ini secara umum terdiri dari dua perlakuan, yaitu *solution treatment* dan *aging*. Penguatan dengan metode ini dapat diaplikasikan pada baja karbon rendah agar kekerasannya meningkat. *Solution treatment* terdiri dari pemanasan baja pada temperatur sedikit di bawah A1 dimana kelarutan dari C di dalam ferit paling besar (lihat Gambar 2.6)



(Thelning, 1984). Fungsi dari *solution treatment* adalah untuk memaksimalkan kelarutan unsur-unsur pemuatan seperti Cu, Mg, dan Si dalam matriksnya. Larutan padat yang terbentuk selama *solution treatment* harus didinginkan dengan cepat untuk mendapatkan kondisi optimum bagi pengendapan yang akan dilakukan sesudahnya. Proses ini biasanya dilakukan dengan pencelupan paduan ke dalam medium air pada suhu ruangan. (Taufiq dan Korda, 2010).



Gambar 2.6 Kelarutan karbon dalam besi α (Thelning, 1984)

Secara umum, dengan naiknya laju pendinginan cepat, kekuatan akan semakin meningkat. Saat waktu pendinginan semakin singkat, atom-atom unsur pemuatan tidak sempat berdifusi ke matriks sehingga menyebabkan matriks dalam keadaan lewat jenuh (*oversaturated*). Semakin besar derajat kelewat jenuhan



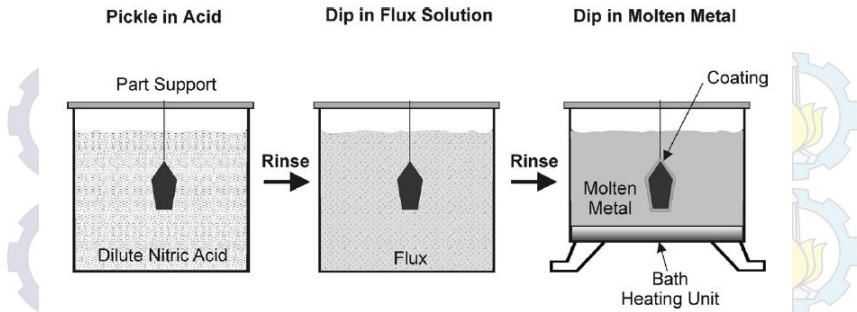
matriks, semakin besar pula laju pengintiannya (Porter dan Easterling, 1992).

Setelah melakukan *solution treatment*, pengerasan paduan dapat dicapai dengan dua cara, yaitu pada saat temperatur kamar (*natural aging*) atau dengan perlakuan panas presipitasi (*artificial aging*). Penuaan pada temperatur kamar akan memakan waktu yang lebih lama. Apabila penuaan dilakukan secara *artificial*, maka lamanya penuaan bergantung pada temperatur pemanasan. Semakin tinggi temperaturnya, semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kekuatan tertentu (Taufiq dan Korda, 2010).

2.7 Hot Dip Coating

Coating atau pelapisan digunakan untuk meningkatkan atau memperbaiki properties suatu material. Material yang digunakan sebagai pelapis tentunya memiliki beberapa kriteria tersendiri. Kriteria ini pun menyesuaikan dengan *based metal* yang digunakan, misalnya saja logam *coating* ini harus punya ketahanan terhadap korosi yang lebih baik daripada *based metal* yang digunakan.

Hot dip coating adalah suatu proses pelapisan dimana logam *coating*-nya dipanaskan terlebih dahulu hingga melebur pada temperatur leburnya, lalu logam dasarnya yang sudah diberi pre treatment maupun tanpa pre treatment dicelupkan pada logam *coating* yang sudah melebur. Sebagian besar prinsip *hot dip coating* umumnya digunakan untuk *galvanizing*, *tinning*, *terne coating*, dan *alumunizing*. Proses hot dip biasanya diawali dengan adanya proses *surface preparation*. Proses *surface preparation* ini dilakukan dengan beberapa proses, yakni *degreasing*, *pickling*, dan *fluxing* (Smith, 2010). Proses *fluxing* ini dilakukan untuk meningkatkan kekuatan adhesi alumunium cair terhadap baja, yakni permukaan baja dibersihkan dengan larutan HCl 1,5% lalu dicelupkan ke dalam larutan $ZnCl_2$, ditambah NH_4Cl dengan perbandingan 3:2 (Moline dkk. 2002).



Gambar 2.7 Hot-dip coating

2.8 Carburizing

Proses karburisasi banyak dilakukan terhadap baja karbon rendah dengan keuletan tinggi dan kemudahannya untuk dilakukan *machining*, namun kekerasannya yang rendah tidak tahan aus menjadi masalah. Kadar karbon yang rendah membuatnya sulit untuk dikeraskan dengan metode biasa.

Karbon aktif ditambahkan dengan mendifusikannya ke kedalaman dan kadar tertentu dalam permukaan baja karbon. Ketika kadar karbon sudah cukup tinggi baru bisa dilakukan pengerasan dengan proses *quenching*. Proses penambahan karbon aktif ini dapat dibedakan berdasarkan media karburisasinya, karburisasi padat, gas dan cairan.

Ketiga proses melibatkan temperatur pemanasan baja hingga temperatur $\pm 850-950^{\circ}\text{C}$ untuk mendifusikan karbon. Waktu yang dibutuhkan untuk difusi tiap-tiap media karburisasi biasanya beberapa jam untuk media karburisasi padat. Mekanisme difusi dari karbon ini yaitu dengan berdifusi hingga batas kelarutannya di permukaan dan berdifusi lebih lanjut ke dalam dimana kadar karbon lebih kecil. Akan terjadi gradient konsentrasi karbon dari permukaan hingga kedalaman tertentu (Suherman, 2003).



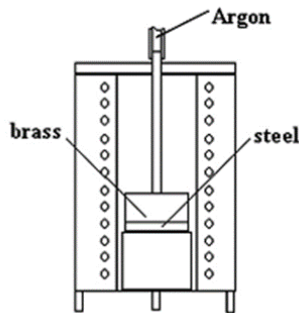
2.9 Nitriding

Proses ini dilakukan dengan memanaskan baja dalam dapur beratmosfer nitrogen aktif, dimana atom-atom nitrogen akan berdifusi ke dalam baja dan berpadu dengan unsur paduan baja membentuk nitrida. Nitrida ini bersifat cenderung keras dan stabil. Nitrogen aktif diperoleh dari pemanasan gas ammonia yang dipanaskan pada temperatur *nitriding* $\pm 500-600^{\circ}\text{C}$. Proses *nitriding* akan sangat terbantu bila dalam baja terkandung unsur pembentuk nitrida, dimana pengaruh adanya pembentuk nitride inilah yang sangat berpengaruh dalam pengerasan pada *nitriding* (Suherman, 2003).

2.10 Furnace Brazing

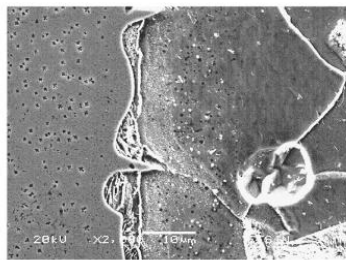
Brazing merupakan suatu proses penyambunagn logam menggunakan panas dan logam pengisi dengan temperatur di atas 840°C . Proses *brazing* pada umumnya menggunakan temperatur $1120^{\circ}\text{C} - 1150^{\circ}\text{C}$ untuk mem-*brazing stainless steel* dengan nikel atau baja karbon dengan tembaga. Untuk *brazing* pada temperatur yang lebih tinggi dapat dijumpai pada proses *brazing molybdenum* dengan nickel dan cobalt dengan paduan cobalt lainnya. Proses ini cukup umum diaplikasikan pada material struktural seperti baja karbon untuk bangunan kapal. Hal ini diaplikasikan untuk memberikan sifat tambahan seperti ketahanan abrasi, ketahanan korosi dan untuk konduktivitas serta panas yang lebih baik.

Pelapisan menggunakan *furnace brazing* seperti Gambar 2.8 pada umumnya dilakukan secara kontinyu. *Based metal* yang akan dilapisi diletakkan di dalam furnace dan dijalankan. Selama *based metal* dijalankan, logam pengisi mulai dilekatkan pada permukaan *based metal* dengan diberi pemanasan dengan temperatur yang tinggi, sehingga logam pengisi melebur dan melapisi *base metal* itu sendiri (Molleda, 2007).

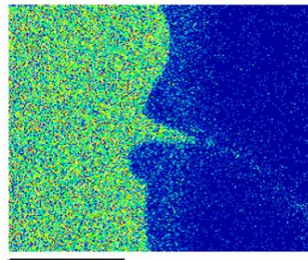


Gambar 2.8 Furnace untuk Proses Brazing (Molleda, 2007)

Molleda menginvestigasi bahwa selama proses *brazing*, tembaga terpenetrasi ke dalam baja di sepanjang batas butir seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9(a) dan 2.9(b). Hal ini terjadi pada daerah kontak antara baja dan tembaga yang notabene merupakan daerah difusi tingkat tinggi.



(a)

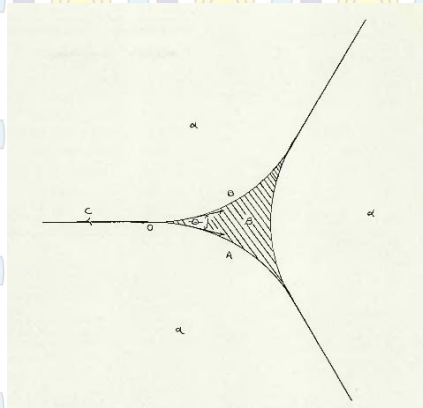


(b)

Gambar 2.9 (a) Difusi Tembaga ke dalam Baja Sepanjang Batas Butir (b) Citra X-ray dari Daerah Pertemuan Antara Tembaga dan Baja (Molleda, 2007)



Pada proses *brazing* ini, penetrasi Cu ke dalam batas butir dari austenit merupakan hal yang lumrah terjadi. Fenomena ini terjadi akibat kontak antara fasa solid dan fasa cair pada sisi antarmukanya. Hal ini membuat fasa dari logam cair terjebak diantara butiran dan terletak di batas butir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Proses ini umumnya terjadi di atas temperatur lebur dari tembaga itu sendiri (Savage, 1978).



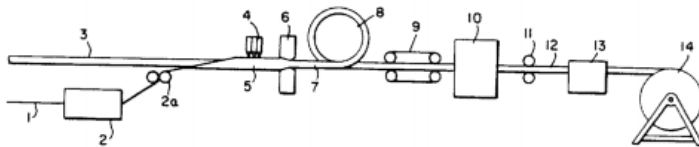
Gambar 2.10 Fasa Logam Cair yang Terjebak di antara Batas Butir (Savage.1978)

2.11 Copper Clad Steel Wire

Copper clad steel adalah proses pembuatan kabel listrik dengan material baja yang dilapisi dengan tembaga. Proses yang ada ada pembuatan kabel listrik ini dengan melewati *strip* tembaga dan kabel baja melalui tahapan. Tahapan proses ini sudah dipatenkan di Amerika Serikat dengan nomor US3894675. Tahapan yang pertama adalah tahap pembentukan dimana *strip* tembaga dibentuk menjadi *tube* yang diameternya lebih besar daripada *steel wire* yang akan digunakan. Yang kedua adalah melalui tahap pengelasan. Pada tahap ini *strip* tembaga *tubular* dilas pada ujung – ujungnya untuk membentuk lapisan longitudinal.



Tahap ketiga adalah tahap reduksi pertama dimana diameter dari *tube* tembaga yang sudah dibentuk direduksi hingga ukuran yang dapat dilekatkan erat secara langsung dengan kabel baja. Tahapan selanjutnya adalah tahapan pemanasan. Tahapan ini adalah tahapan dimana kabel baja yang sudah dilapisi tembaga dipanaskan setidaknya hingga temperatur 850°C . Tahap terakhir adalah tahap reduksi kedua, dimana luas penampang dari kabel baja yang telah dilapisi tembaga ini direduksi atau dikurangi setidaknya 10 persen. Hal ini dilakukan agar menghasilkan ikatan yang lebih erat antara lapisan tembaga yang ada diluar dengan kabel baja didalamnya (Klebl, dkk. 1975).



Gambar 2.11 Proses *Copper Clad Steel Wire*

2.12 Penelitian Sebelumnya

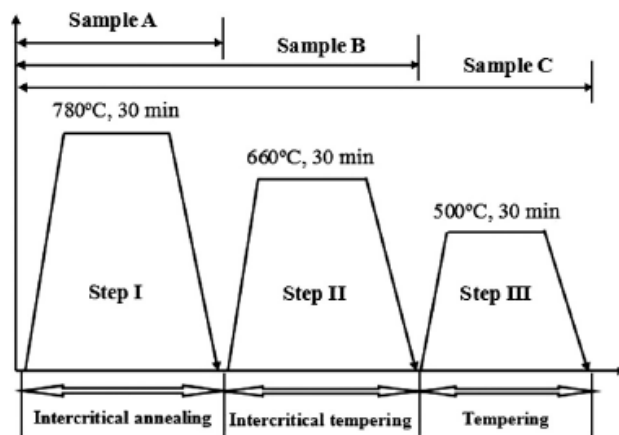
a. *Copper Precipitation and its Impcat on Mechanical Properties in A Low Carbon Microalloyed Steel by Three Steps Heat Treatment*

Studi mengenai pengaruh tembaga dalam baja karbon rendah yang dilakukan oleh Zhou, dkk menggunakan baja dengan kadar karbon 0,11%C. Unsur yang ditambahkan sebagai *microalloy* adalah Niobium agar memberi efek *grain refintment* dan penguatan presipitasi, Cu dan Mo untuk penguatan presipitasi.

Baja dicairkan pada *vacuum induction furnace* dan dicor menjadi *ingot* seberat 40 kg dan di-*forging* membentuk blok yang selanjutnya akan di-*rolling*. Baja blok dihomogenisasi terlebih dahulu dengan dipanaskan kembali pada 1200°C selama 2 jam. Selanjutnya, blok di-*roll* dengan ketebalan 8 mm melalui *six-passes* dan didinginkan dengan media udara. Struktur mikro dari



baja sewaktu di-roll berupa bainit dan martensit. Temperatur optimal *annealing* dan *tempering* yang dipilih berdasar penelitian sebelumnya adalah 780°C dan 660°C . Temperatur tempering pada perlakuan panas tahap ketiga dipakai 500°C untuk mendapatkan presipitasi tembaga yang halus. Skema tiga tahap perlakuan panas dapat dilihat pada Gambar 2.12.



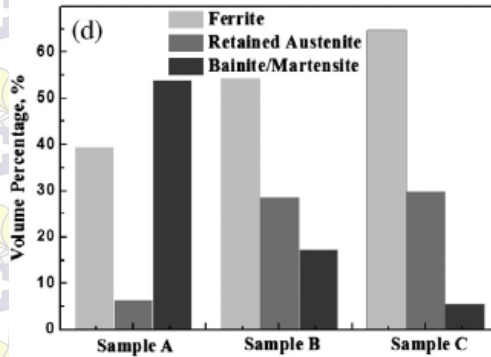
Gambar 2.12 Skema Tiga Tahap Perlakuan Panas

Dari hasil pengamatan SEM ketiga sampel diperoleh bahwa pada sampel A memiliki struktur mikro *dual-phase* terdiri dari ferit dan bainit/martensit. Sementara sampel B dan C mengandung struktur mikro *multi-phase* terdiri dari ferit, austenit sisa, dan bainit/martensit. Fraksi volume dari ferit sendiri meningkat dari sampel A ke sampel C, sedangkan bainit/martensit justru berkurang. Fraksi volume dari fasa pada ketiga sampel dapat dilihat pada Gambar 2.13.

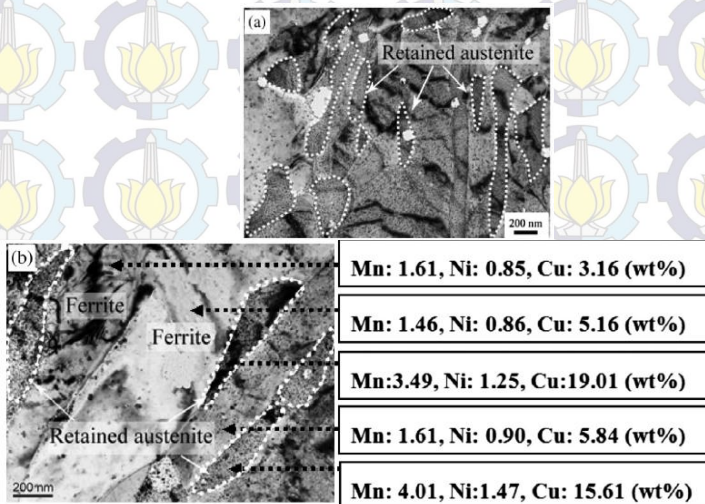
Karakterisasi dari austenit sisa menunjukkan bahwa meskipun telah melewati perlakuan panas sebanyak tiga kali tetapi fraksi volume dari austenit sisa tetap tinggi pada sampel B dan C. Hal tersebut menunjukkan bahwa austenit sisa menjadi lebih stabil pada temperatur yang cukup tinggi (500°C). Selain itu,



dari dari Gambar 2.14 tampak hasil pengamatan TEM yang menunjukkan austenit sisa terdapat di antara ferit atau ferit dan bainit. Presipitat tampak lebih homogen dan pada ferit dan bainit terdapat sejumlah kecil presipitat. Dari hasil EDX pun menunjukkan peningkatan jumlah Cu pada austenit sisa.



Gambar 2.13 Fraksi Volume Fasa Sampel

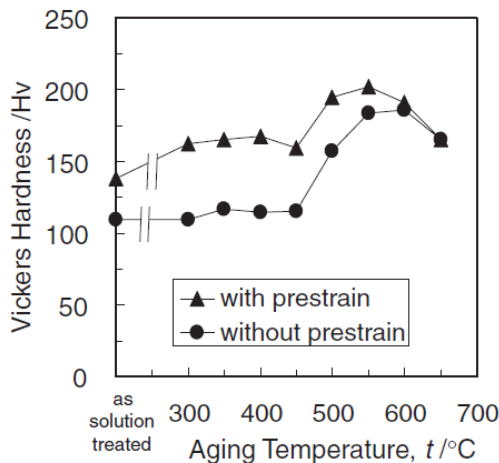


Gambar 2.14 (a) Hasil TEM Austenit Sisa (b) Hasil EDS pada Fasa



Tembaga diketahui memiliki kelarutan yang tinggi di dalam austenit. Presipitat tembaga (fcc) terbentuk dari daerah yang kaya Cu selama proses *aging* dan tumbuh seiring dengan peningkatan waktu *aging*. Keberadaan tembaga pada austenit sisa disebabkan terjadinya difusi selama proses tempering. Adanya penambahan unsur paduan menyebabkan turunnya temperatur A1 sehingga transformasi terjadi pada temperatur yang lebih rendah pada daerah ini. Hal tersebut menyebabkan tembaga berdifusi dari ferit ke austenit sisa (Zhou, dkk. 2014).

b. Effect of Copper on Tensile Properties and Grain-Refinement of Steel and its Relation to Precipitation Behavior

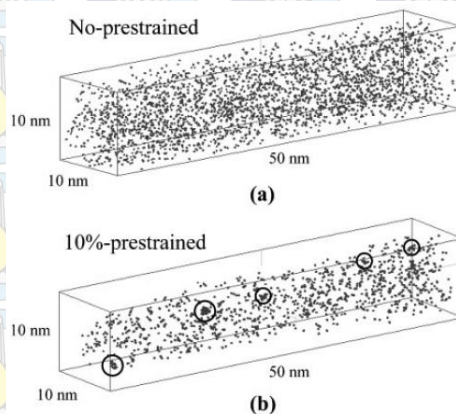


Gambar 2.15 Hasil Uji Kekerasan

Penelitian ini dibedakan menjadi dua bagian, yaitu meneliti tentang perilaku pengerasan dari Cu dan pengaruh Cu sebagai *grain-refinement*. Metode yang dilakukan secara umum adalah dengan mencairkan baja lalu di-*hot rolled* dan di-*cold rolled*, selanjutnya baja dipanaskan kembali untuk *solution treatment* dan di-*aging*. Perilaku presipitat yang terbentuk diamati dengan OTAP (*Optical Tomographic Atom Probe*) dan



dilakukan juga uji kekerasan dengan metode Vickers. Hasil uji kekerasan pada Gambar 2.15 menunjukkan bahwa kekerasan maksimum diperoleh saat temperatur *aging* 550-650°C. Untuk pengujian OTAP dapat dilihat hasilnya pada Gambar 2.16. terdapat perbedaan antara sampel yang diperlakukan dan tidak. Pada sampel tanpa perlakuan tembaga tersebar hampir ke seluruh bagian, sementara sampel yang telah diperlakukan menunjukkan adanya kluster tembaga.



Gambar 2.16 Hasil OTAP (a) Sampel Tanpa Perlakuan (b) Sampel Hasil *Aging* (Takaki, dkk. 2004)

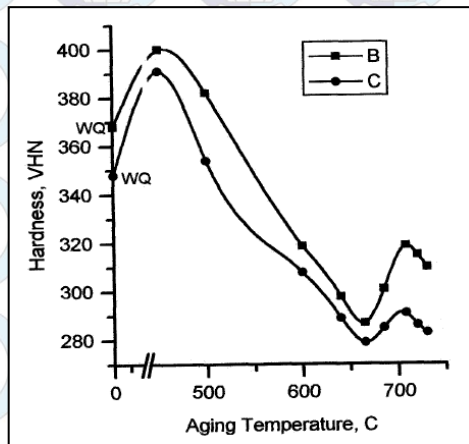
c. *HSLA 100-Steels Influence of Aging Heat Treatment on Microstructure and Properties*

Penelitian ini dilakukan pada plat baja dengan komposisi seperti pada Tabel 2.4. Perlakuan panas yang dilakukan meliputi austenisasi pada temperatur 900°C selama 1 jam diikuti dengan *water quench*. Kemudian plat di-*aging* selama 1 jam pada *range* temperatur 450-730°C dan didinginkan dengan media udara.

**Tabel 2.4** Komposisi sampel HSLA-100

Komposisi, wt%						
C	Mn	Cu	Si	Cr	Al	N
0,036	0,91	1,60	0,24	0,59	0,022	0,008

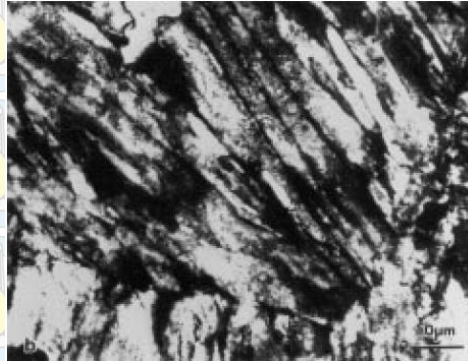
Hasil uji kekerasan pada Gambar 2.17 menunjukkan adanya perbedaan pada daerah dengan *range* temperatur berbeda. Pada *range* I (di bawah 450°C) memiliki nilai kekerasan maksimum. *Range* II (450-665°C) terjadi penurunan secara kontinyu. Di sekitar temperatur 708°C (stage III) terjadi *secondary strengthening* dan kekerasan kembali menurun pada temperatur di atas 708°C (stage IV).

**Gambar 2.17** Variasi Temperatur Aging terhadap Kekerasan HSLA-100

Dari gambar struktur mikro sampel *water-quench* pada Gambar 2.18 yang diambil dengan TEM tampak adanya martensit dan sejumlah kecil austenit sisa. Austenit sisa ditemukan di antara bilah martensit. Pada *aging* dengan *range* I masih didapati adanya bilah martensit seperti pada baja *water-quench*, tetapi pada



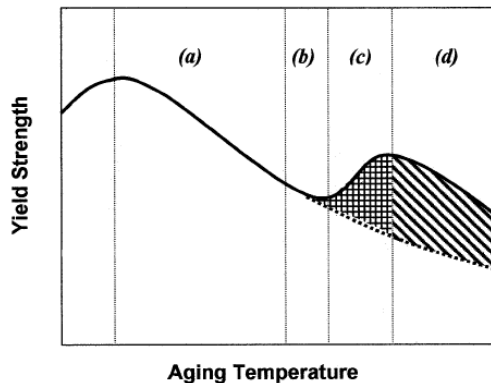
beberapa daerah didapati adanya *fine copper cluster* dan presipitan Nb(C, N) dengan bentuk *spherical*.



Gambar 2.18 Mikrograf TEM Baja *Water-Quench*

Presipitat tembaga dengan bentuk *spherical* terdapat pada baja dengan *range* temperatur *aging* II. Pada *range* temperatur *aging* III sepenuhnya telah terjadi *recovery* tetapi belum keseluruhan mengalami rekristalisasi dan didapati adanya fasa austenit baru pada pemanasan mencapai 665°C. Austenit baru yang terbentuk pada *range* temperatur *aging* III bertransformasi menjadi bainit halus pada *range* temperatur *aging* IV.

Gambar 2.19 menunjukkan perubahan temperatur *aging* terhadap kekuatan *yield*. Daerah (a) menunjukkan *range* temperatur terjadinya *recovery* dari matriks baja diikuti dengan pembentukan partikel presipitat Cu, daerah (b) merupakan daerah temperatur pembentukan austenit baru, (c) daerah dimana austenit baru bertransformasi menjadi martensit, dan (d) merupakan *range* temperatur terjadinya transformasi dari austenit baru menjadi bainit (Mujahid. 2007).



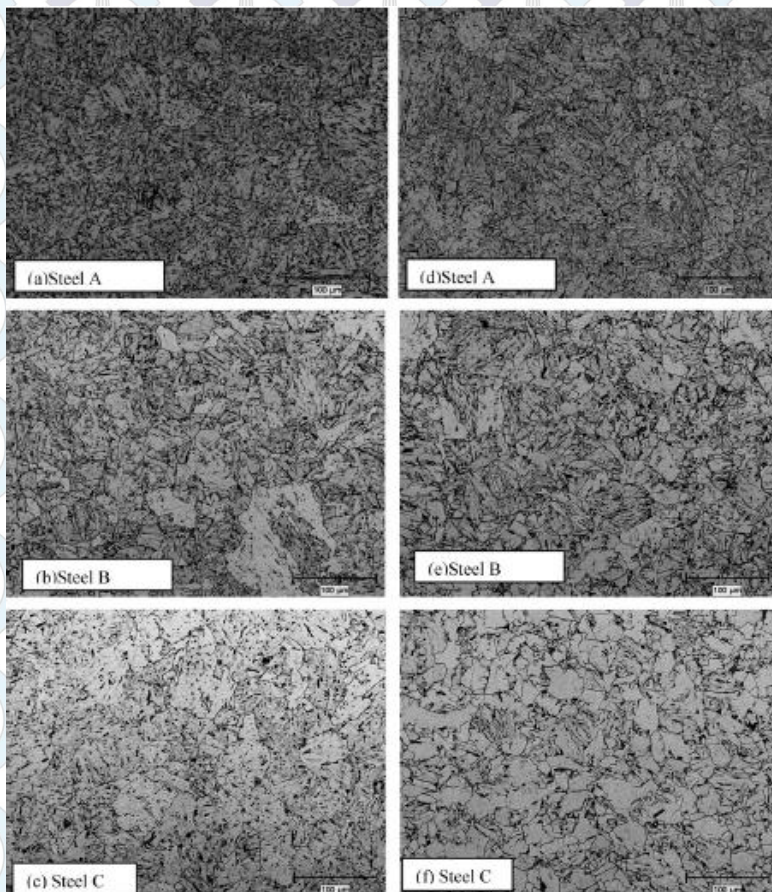
Gambar 2.19 Perilaku *aging* dari HSLA Copper-Bearing Steels

d. Analysis of Copper Effect on Microstructure and Mechanical Properties in Microalloyed Steel

Penelitian ini dilakukan oleh Elwazri, dkk ini menganalisis tentang pengaruh dari penambahan unsur paduan Nb dan Cu pada baja dengan kadar karbon sekitar 0,03% di bawah deformasi dingin. Material yang digunakan memiliki komposisi seperti Tabel 2.5. Sampel yang dipakai dipanaskan dalam *radiant furnace* lalu didinginkan dengan laju pendinginan 1°C/s sampai ke temperatur 400°C , ditahan selama 5 menit agar sampel homogen. Kemudian sampel ditekan dengan regangan antara 0,06-0,2 pada *strain rate* konstan dan ditahan pada tempoeratur tersebut dari 10-180 menit. Proses ini kemudian diikuti dengan pendinginan dengan media udara. Selain itu juga terdapat sampel yang dipanaskan kembali seperti proses di atas dan di-*aging* pada temperatur 400°C dengan rentang waktu 10-180 menit, diikuti dengan pendinginan dengan media udara.

**Tabel 2.5** Komposisi Kimia Sampel Uji (wt%)

Baja	C	Mn	Si	Cu	Nb	Ti	Mo	N
A	0,038	1,8	0,28	0,42	0,09	0,02		0,0092
B	0,049	1,6	0,08	0,4	0,07	0,02	0,3	0,009
C	0,039	1,6	0,08		0,07	0,02	0,3	0,09

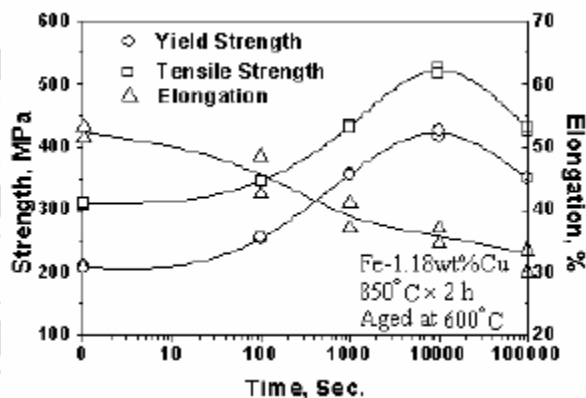
**Gambar 2.20** Struktur Mikro Baja Hasil Aging (a,b,c) dan Deformasi Dingin(d,e,f)



Berdasarkan hasil pengamatan dengan mikroskop optik diperoleh struktur mikro seperti pada Gambar 2.20. Pada keseluruhan baja, baik yang hanya di-*aging* maupun dideformasi dingin memiliki fasa berupa ferit yang tidak beraturan dan fasa kedua yang tersebar di antara butir ferit. Fasa kedua tersebut dapat berupa perlit dan/atau *acicular ferrite*. Dapat dilihat pula terjadi penghalusan butir pada sampel setelah dideformasi dingin dibanding sampel yang hanya di-*aging* (Elwazri. 2007).

e. Cu Precipitation Dynamics in Fe-Cu Alloy

Penelitian tentang dinamika presipitasi tembaga pada paduan Fe-Cu. Paduan dengan kadar tembaga 1,18% dicairkan dalam kondisi vakum. Baja di-*forging* dan di-*rolling* sebelum di-*dissolution treatment* pada temperatur 850°C selama 2 jam untuk mencapai kondisi *solid state* dan di-*quench* dengan *salt-bath*. Aging dilakukan pada salt-bath furnace dengan rentang waktu 10-10.000 detik diikuti dengan pendinginan dengan media udara.

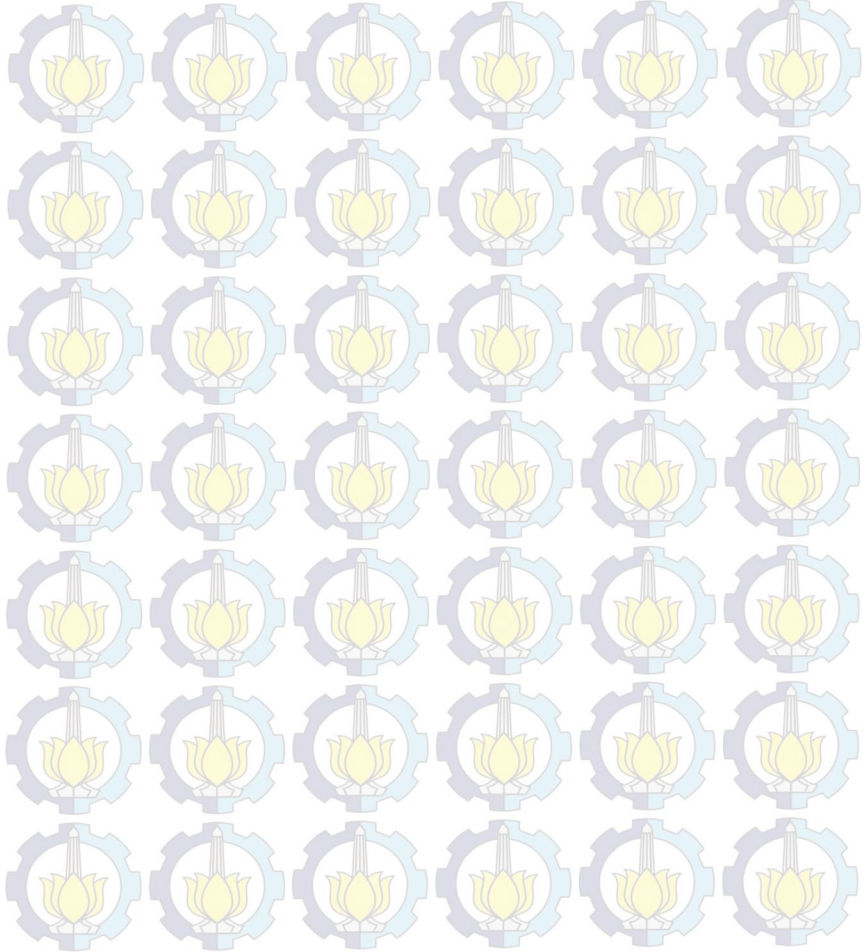


Gambar 2.21 Perubahan Kekuatan Paduan Fe-1,18% Cu Selama Aging pada 600°C

Pengukuran kekuatan dilakukan pada tiga rentang waktu yang berbeda untuk tiap sampel. Pada Gambar 2.21 tampak

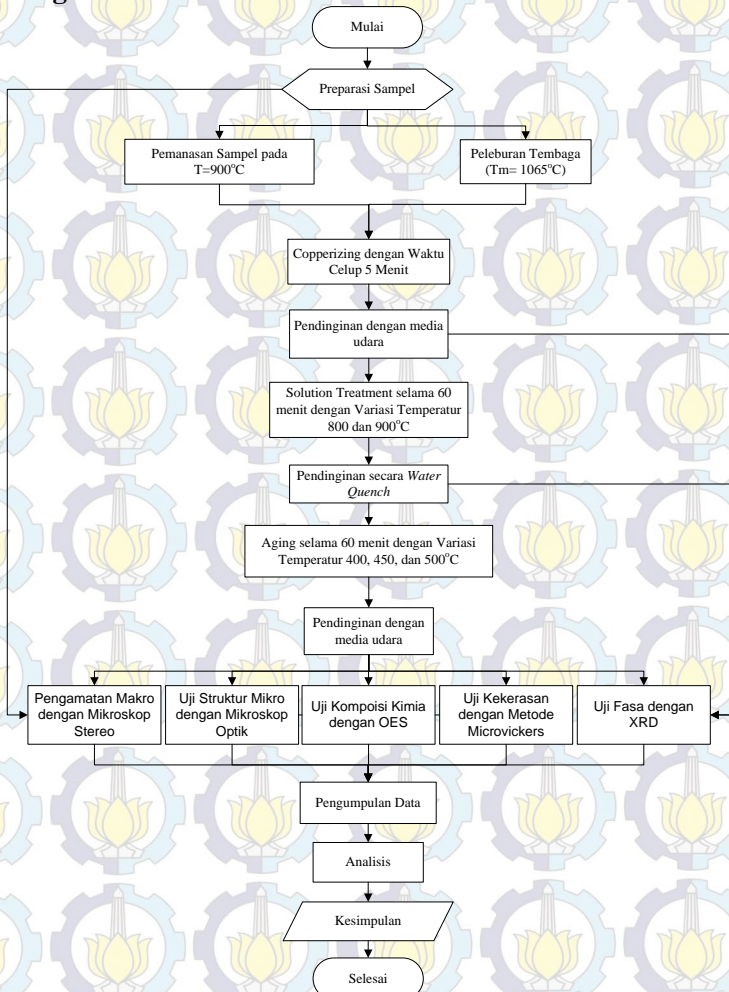


adanya perubahan kekuatan selama proses *aging* di temperatur 600°C terhadap fungsi waktu *aging*. Tampak adanya penguatan dari *aging* dan adanya perilaku *over-aging* pada semua sampel. Perilaku tersebut berkaitan dengan perilaku presipitasi tembaga dan pertumbuhan presipitat (Ren, Wang, dan Liu. 2007).



BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir



3.2 Alat dan Bahan Penelitian

a. Bahan-bahan Penelitian

1. Plat baja AISI 1006
2. Tembaga murni
3. Larutan etsa Nital (HNO_3 dan methanol)
4. Resin
5. Katalis
6. *Metal polish*
7. Air

b. Alat-alat Penelitian

1. *Cutting tool*
Digunakan untuk memotong tembaga murni, sampel awal (baja AISI 1006), sampel hasil *copperizing*, sampel hasil *solution treatment*, dan sampel hasil *aging*.
2. *Muffle furnace*
Digunakan untuk memanaskan (*pre-heat*) baja AISI 1006, mencairkan tembaga, melakukan *solution treatment*, dan *aging*.
3. *Crucible* grafit
Digunakan sebagai wadah tembaga saat dileburkan dan tempat *copperizing*.
4. Penjepit logam
Digunakan untuk memasukkan dan mengambil sampel ke atau dari *muffle furnace*.
5. Ember
Sebagai tempat air untuk *water quench*.
6. Pipa Sok
Digunakan sebagai cetakan sampel uji metalografi saat *mounting*.
7. Kertas Amplas
Digunakan untuk *grinding* saat preparasi sampel untuk uji metalografi.



8. Mikroskop stereo

Digunakan untuk mengamati penampang melintang secara makro dari *copperized-AISI 1006*, sampel hasil *solution treatment*, dan sampel hasil *aging*.

9. Alat uji kekerasan

Digunakan untuk mengukur kekerasan baja AISI 1006, sampel hasil *copperizing*, sampel hasil *solution treatment*, dan sampel hasil *aging*.

10. Mikroskop optik

Digunakan untuk mengamati struktur mikro dari baja AISI 1006, sampel hasil *copperizing*, sampel hasil *solution treatment*, dan sampel hasil *aging*.

11. Alat uji XRD

Digunakan untuk mengetahui kandidat fasa yang terbentuk pada sampel hasil *copperizing*, sampel hasil *solution treatment*, dan sampel hasil *aging*.

12. Alat uji OES

Digunakan untuk mengukur komposisi unsur-unsur pada baja AISI 1006 dan sampel hasil *copperizing*.

3.3 Prosedur Penelitian

a. Preparasi Sampel

Preparasi sampel meliputi pemotongan baja AISI 1006 untuk *copperizing* dan sampel kontrol. Sampel untuk *copperizing* dipotong dengan dimensi 70x30x3 mm dan permukaannya dibersihkan dengan kertas amplas. Sampel kontrol dipotong untuk pengujian metalografi, kekerasan, dan Optical Emission Spectroscopy (OES).



b. Pengujian Baja AISI 1006

Untuk mengetahui kondisi awal sampel sebelum dilakukan *copperizing* dilakukan pengujian metalografi, kekerasan, dan OES.

- a. Uji struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui struktur mikro dari sampel sebelum di-*copperizing* dan selanjutnya dilakukan perhitungan luas butir rata-rata sesuai dengan ASTM E112. Etsa yang dipakai yaitu nital 2%.
- b. Uji kekerasan yang dipakai adalah *microvickers* dengan indenter piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan 136° , terbuat dari intan sesuai dengan ASTM E384. Sebelum dilakukan pengujian sampel dipreparasi dengan grinding, polishing, dan etching dengan nital 2%. Tujuannya untuk mengetahui kekerasan dari sampel sebelum di-*copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.
- c. Uji *Optical Emission Spectroscopy* (OES) dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur penyusun baja AISI 1006. Pengujian dilakukan di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya menggunakan alat Foundry-Master Pro.

c. Peleburan Tembaga

Sebelum dilebur, tembaga terlebih dahulu dipotong-potong dengan ukuran sembarang agar dapat masuk ke *crucible* grafit. Selanjutnya bak instrumen dimasukkan ke dalam furnace dan dipanaskan sampai temperatur leleh tembaga (1065°C). Banyaknya tembaga yang dileburkan dalam sekali peleburan sekitar 1,2 kg.

d. Pemanasan Sampel

Selama proses peleburan tembaga berjalan, sampel baja AISI 1006 yang akan di-*copperizing* terlebih dahulu dipanaskan



dengan *muffle furnace* pada temperatur 900°C. Sampel yang dipanaskan sebanyak 4 buah.

e. Proses *Copperizing*

Setelah dipanaskan pada temperatur 900°C, sampel dikeluarkan satu persatu dan dicelupkan ke dalam tembaga cair dengan menggunakan penjepit logam. Pencelupan dilakukan selama 5 menit untuk masing-masing sampel. Setelah mencapai waktu pencelupan yang ditentukan, sampel diangkat dari tembaga cair dan didinginkan dengan media udara.

f. Pengujian Sampel Hasil *Copperizing*

Untuk mengetahui kondisi sampel setelah dilakukan *copperizing* dilakukan pengamatan makro, pengujian metalografi, kekerasan, OES, dan XRD.

- a. Pengamatan makro dilakukan dengan mikroskop stereo di Laboratorium Metalurgi Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui keberadaan lapisan tembaga pada permukaan sampel.
- b. Uji struktur mikro dilakukan dengan mikroskop optik di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui struktur mikro dari sampel setelah di-*copperizing* dan selanjutnya dilakukan perhitungan luas butir rata-rata sesuai dengan ASTM E112. Etsa yang dipakai yaitu nital.
- c. Uji kekerasan yang dipakai adalah *microvickers* dengan indentor piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan 136°, terbuat dari intan sesuai dengan ASTM E384. Sebelum dilakukan pengujian sampel dipreparasi dengan grinding, polishing, dan etching dengan nital 2%. Tujuannya untuk mengetahui kekerasan dari sampel setelah di-*copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.
- d. Uji Optical Emission Spectroscopy (OES) dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur sampel setelah proses *copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Uji Bahan



Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya menggunakan alat Foundry-Master Pro.

- e. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk setelah proses *copperizing*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITS.

g. Proses *Solution treatment*

Sampel hasil *copperizing* selanjutnya dipanaskan lagi dengan variasi temperatur yang telah ditentukan selama 60 menit. Proses pendinginannya dilakukan secara *water-quench*.

h. Proses *Aging*

Sampel yang telah didinginkan secara *water quench* dipanaskan kembali pada temperatur yang telah ditentukan selama 60 menit. Kemudian dilakukan pendinginan dengan media udara (*normalizing*). Rancangan penelitian untuk variasi waktu pemanasan dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rancangan Percobaan

Temperatur <i>Solution treatment</i>	Temperatur <i>Aging</i>
800°C	400°C
	450°C
	500°C
900°C	400°C
	450°C
	500°C

i. Pengujian Sampel

Untuk mengetahui kondisi sampel setelah dilakukan *solution treatment* dan *aging* dilakukan pengamatan makro, pengujian metalografi, kekerasan, SEM/EDX, dan XRD.

- a. Pengamatan makro dilakukan dengan mikroskop stereo di Laboratorium Metalurgi Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui keberadaan lapisan tembaga pada permukaan sampel.



- b. Uji metalografi dilakukan dengan mikroskop optik di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Tujuannya untuk mengetahui struktur mikro dari sampel setelah *solution treatment* dan *aging* dan selanjutnya dilakukan perhitungan ukuran butir rata-rata sesuai dengan ASTM E112. Etsa yang dipakai yaitu nital.
- c. Uji kekerasan yang dipakai adalah Vickers *microhardness* dengan indenter piramida sisi empat terbalik yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang saling berhadapan 136° , terbuat dari intan sesuai dengan ASTM E384. Tujuannya untuk mengetahui kekerasan dari sampel setelah *solution treatment* dan *aging*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.
- d. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan untuk mengetahui fasa yang terbentuk setelah proses *solution treatment* dan *aging*. Pengujian dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material Teknik Material dan Metalurgi ITS.

j. Analisis

a. Analisis Mikro Struktur

Hasil uji metalografi yang berupa struktur mikro dari baja AISI 1006 tanpa perlakuan, sampel *copperizing*, *solution treatment*, dan *aging* dibandingkan untuk melihat pengaruh dari penambahan tembaga serta temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap struktur mikro baja AISI 1006. Dari hasil perhitungan ukuran butir rata-rata juga dapat dianalisis pengaruh dari penambahan tembaga serta temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap ukuran butir baja AISI 1006.

b. Analisis Kekerasan

Dari hasil uji kekerasan baja AISI 1006 tanpa perlakuan, sampel *copperizing*, *solution treatment*, dan *aging* dianalisis pengaruh penambahan tembaga serta temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap nilai kekerasan baja AISI 1006.



c. Analisis Kadar Tembaga

Dari hasil uji OES baja AISI 1006 dan sampel *copperizing* dianalisis perubahan kadar tembaga yang terdapat di dalam baja.

d. Analisis Fasa

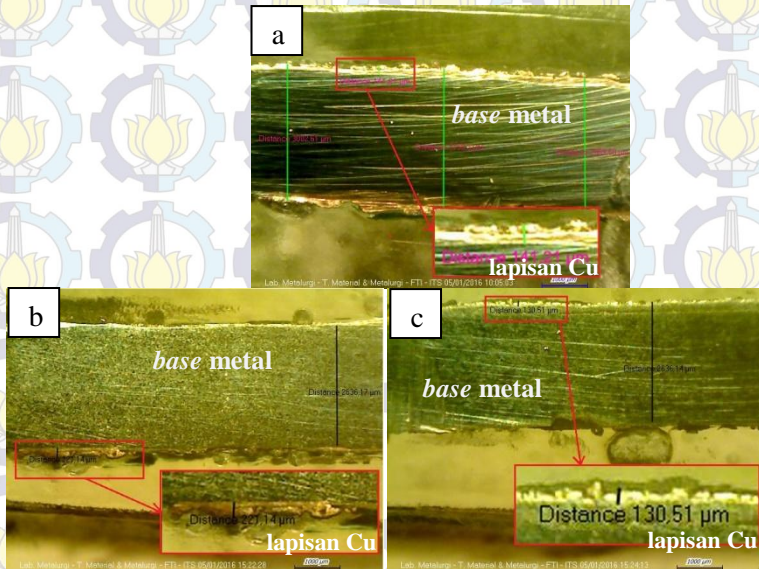
Pengaruh dari penambahan tembaga serta temperature *solution treatment* dan *aging* terhadap fasa-fasa yang terbentuk pada baja AISI 1006 dapat dianalisis melalui hasil uji XRD sampel *copperizing*, *solution treatment*, dan *aging*.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengamatan Makro

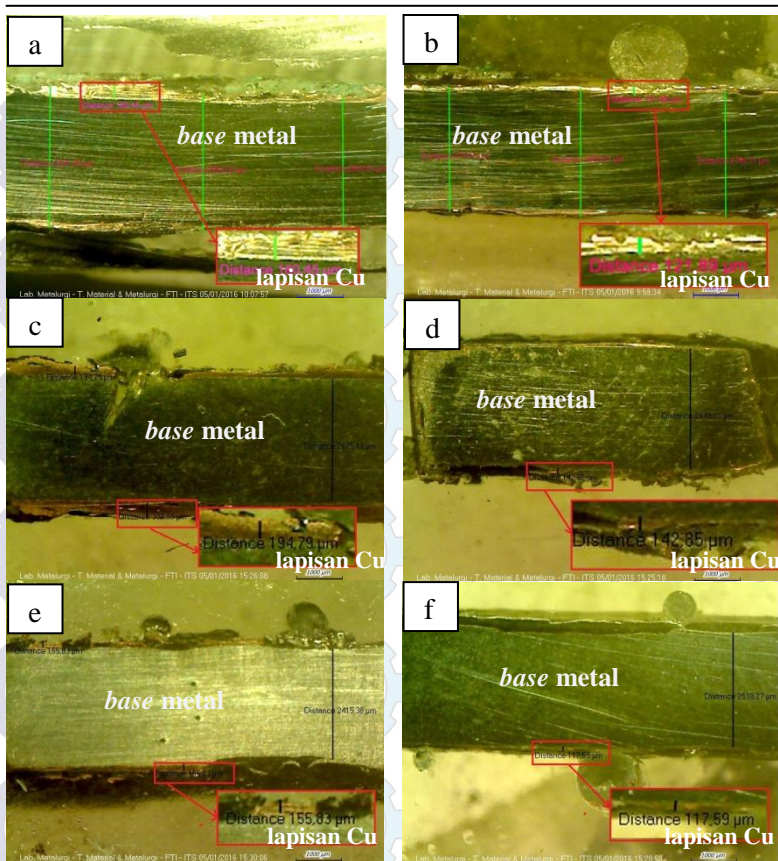
Pengamatan makro dilakukan menggunakan mikroskop stereo dengan perbesaran 10 kali. Hasil pengamatan pada sampel *copperized*-AISI 1006 dan *solution treatment* dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Penampang Melintang (a) *Copperized*-AISI 1006 dan *Solution Treatment* (b) 800°C (c) 900°C

Dari Gambar 4.1a terlihat adanya lapisan tembaga yang terdapat pada bagian permukaan baja setelah di-*copperizing*. Hal tersebut terjadi karena adanya tembaga yang belum terdifusi ke dalam baja ketika sampel diangkat dari tembaga cair, sehingga tembaga membentuk lapisan pada permukaan sampel.

Lapisan tembaga juga masih terlihat pada permukaan sampel setelah di-*solution treatment*. Adanya lapisan tembaga



Gambar 4.2 Penampang Melintang Sampel *Solution treatment* 800°C dengan Aging (a)400°C, (b) 450°C, (c) 500°C, dan *Solution treatment* 900°C dengan Aging (d)400°C, (e) 450°C, dan (f) 500°C

juga masih nampak pada sampel setelah dilakukan proses *aging* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pemanasan yang terjadi selama *solution treatment* dan *aging* belum mampu mendifusikan tembaga yang ada di permukaan baja setelah *copperizing*. Dari gambar terlihat



adanya lapisan tembaga dengan berbagai ketebalan yang tidak membentuk hubungan dengan temperatur *solution treatment* dan *aging* yang dilakukan.

4.2 Hasil Pengujian *Optical Emission Spectroscopy* (OES)

Pengujian spektroskopi dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur-unsur penyusun baja AISI 1006 sebelum dan setelah proses *copperizing*.

Tabel 4.1 Hasil OES Baja AISI 1006 dan *Copperized*-AISI 1006

	Komposisi, %					
	Fe	C	Mn	Cu	P	S
AISI 1006	99,5	0,0358	0,210	0,0375	0,0091	0,008
<i>Copperized</i>- AISI 1006	99,4	0,0721	0,218	0,0860	0,0142	0,009

Tabel 4.1 menunjukkan komposisi unsur-unsur pada baja AISI 1006 sebelum dan sesudah dilakukan proses *copperizing*. Dari hasil pengujian diperoleh kenaikan kadar Cu (tembaga) pada baja, dimana sebelum di-*copperizing* kadar tembaga 0,0375% dan setelah di-*copperizing* menjadi 0,0860%. Hal tersebut menunjukkan terjadinya penambahan kadar tembaga ke dalam baja AISI 1006 sebanyak 0,0485 %.

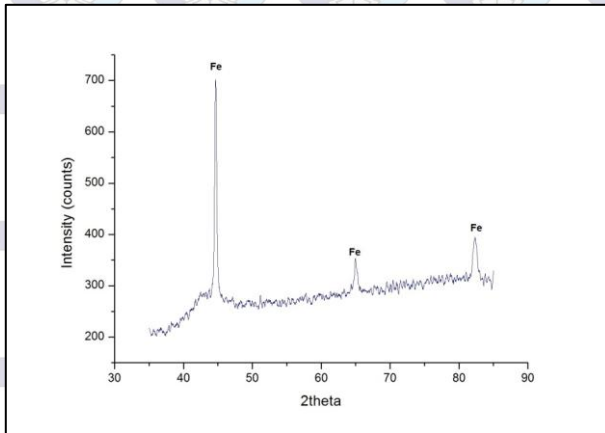
4.3 Hasil Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

Pengujian XRD dilakukan pada baja AISI 1006 tanpa perlakuan, sampel *copperizing*, *solution treatment*, dan *aging*. Pengukuran difraksi sinar-X dilakukan dengan rentang sudut 10-90° dan menggunakan panjang gelombang Cu-K α 1.54060Å. Dari hasil XRD diperoleh *peak-peak* dengan intensitas tertentu. *Peak-peak* yang memiliki intensitas tertinggi dicocokkan dengan kartu PDF untuk mengetahui fasa atau senyawa apa yang terdapat pada sampel.



a. Hasil Pengujian XRD baja AISI 1006

Gambar 4.3 menunjukkan grafik hasil XRD baja AISI 1006. Dari hasil analisis menunjukkan adanya kecocokan antara hasil XRD dengan kartu PDF 87-0721 dan didapatkan bahwa ketiga *peak* tertinggi milik fasa Fe- α . Selain itu mengacu pada diagram fasa Fe-Fe₃C (Gambar 2.1), baja dengan kadar karbon 0,0375% memang memiliki fasa yang dominan berupa Fe- α pada temperatur kamar.



Gambar 4.3 Grafik Hasil XRD Baja AISI 1006

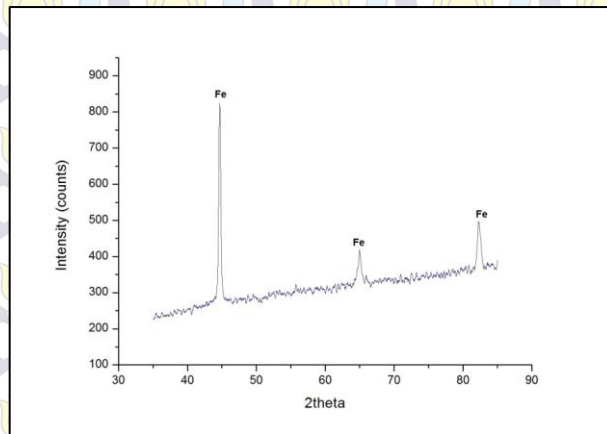
Peak tertinggi terdapat pada $2\theta = 44,6563^\circ$ dengan *peak height* sebesar 487,49 cts. Untuk *peak* tertinggi kedua dengan *peak height* 73,89 cts terletak pada $2\theta = 82,3476^\circ$ dan *peak* tertinggi ketiga memiliki *peak height* 68,47 cts pada $2\theta = 64,9553^\circ$.

b. Hasil Pengujian XRD Copperized-AISI 1006

Hasil pengujian XRD untuk sampel *copperized-AISI 1006* dapat dilihat pada Gambar 4.4. Nilai 2θ dari *peak-peak* tertinggi terdapat pada daerah yang sama dengan 2θ dari baja AISI 1006. *Peak* tertinggi terletak pada $2\theta = 44,6594^\circ$ dengan



peak height 585,4 cts. *Peak* tertinggi kedua dan ketiga terletak pada $2\theta = 82,2498^\circ$ dan $64,9733^\circ$ dengan *peak height* 124,98 cts dan 92,37 cts. *Peak-peak* tersebut juga memiliki kecocokan dengan kartu PDF 87-0721 dan merupakan *peak* milik Fe- α . Hasil analisis tersebut sesuai dengan diagram fasa Fe-Cu, dimana fasa yang dimiliki oleh paduan Fe-Cu dengan kadar tembaga yang sangat rendah berupa Fe- α .

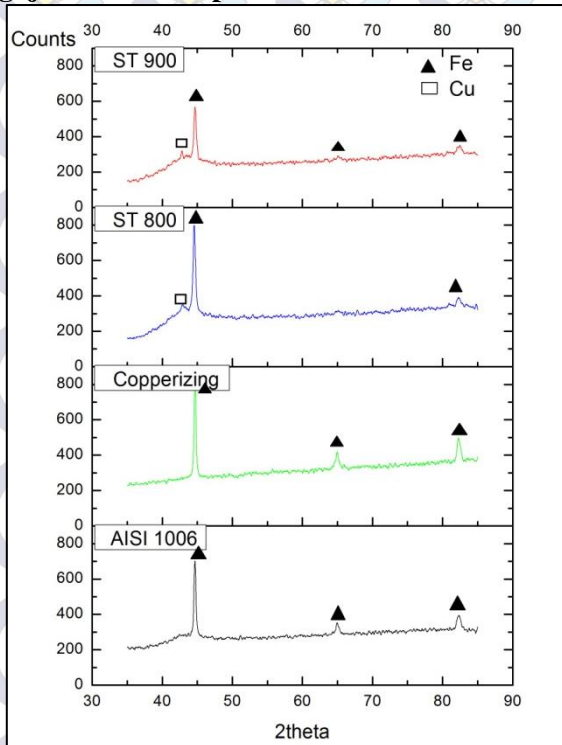


Gambar 4.4 Grafik Hasil XRD *Copperized-AISI 1006*

Dari Tabel 4.2 tampak adanya perubahan besarnya FWHM (*full width at half maximum*) pada intensitas tertinggi dari sampel sebelum dan sesudah di-*copperizing*. Perubahan nilai FWHM menunjukkan adanya *peak broadening* atau pelebaran puncak dan dapat digunakan untuk menghitung besarnya *microstrain*. Dari tabel 4.2 terlihat adanya kenaikan nilai *microstrain* dari baja AISI 1006 ke *copperized-AISI 1006*. Hal tersebut mengindikasikan adanya unsur paduan (Cu) yang terlarut ke dalam Fe- α setelah baja di-*copperizing*. Hal tersebut juga sesuai dengan hasil uji spektroskopi yang menunjukkan kenaikan kadar Cu setelah *copperizing*.


Tabel 4.2 Hasil XRD Baja AISI 1006 dan *Copperized-AISI 1006*

Sampel	2 θ (°)	Height (cts)	FWHM	ε
AISI 1006	44,6563	487,49	0,0836	0,0005
<i>Copperized-AISI 1006</i>	44,6594	585,4	0,2342	0,0041

c. Hasil Pengujian XRD Sampel *Solution Treatment*

Gambar 4.5 Hasil XRD Baja AISI 1006, *Copperized-AISI 1006*, dan Sampel *Solution Treatment*



Hasil XRD dari sampel *solution treatment* dapat dilihat pada Gambar 4.5. Untuk intensitas tertinggi memiliki kesesuaian dengan kartu PDF 87-0721 yang merupakan milik Fe- α . Intensitas tertinggi ketiga dan keempat juga bersesuaian dengan puncak milik Fe- α . Hal ini sesuai dengan diagram fasa Fe-Cu, dimana dengan kadar Cu yang sangat rendah fasa yang terjadi adalah Fe- α .

Tetapi, pada hasil XRD kedua sampel *solution treatment* terdapat *peak* yang merupakan milik Cu pada sudut $2\theta = 42,9228^\circ$ untuk *solution treatment* 800°C dan $2\theta = 42,7602^\circ$ untuk *solution treatment* 900°C . Puncak ini bersesuaian dengan kartu PDF 85-1326. Munculnya puncak Cu ini terjadi karena difusi lanjutan dari Cu yang terdapat di permukaan sampel selama proses pemanasan *solution treatment*. Tetapi karena telah melewati batas kelarutan dari Cu di dalam Fe maka Cu yang baru berdifusi tersebut tidak terlarut di dalam larutan padat Fe, tetapi berdifusi ke batas butir. Yourong (1992) juga menyatakan dalam penelitiannya bahwa tembaga dapat berdifusi masuk ke dalam butiran ferit atau batas butirnya.

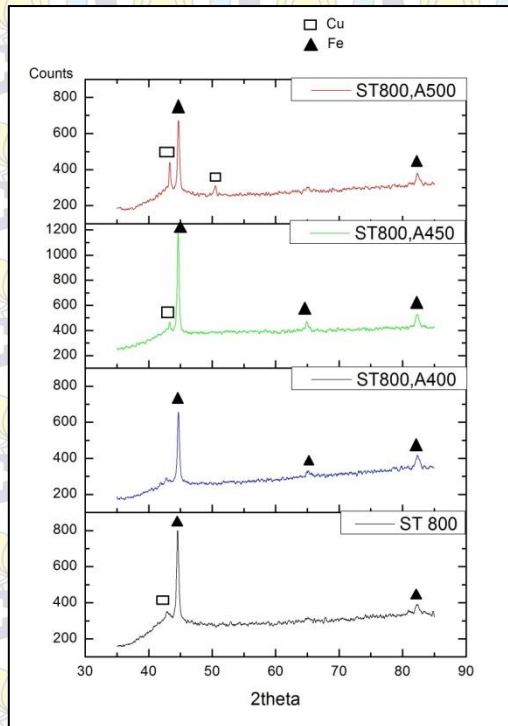
d. Hasil XRD Sampel Aging

Hasil pengujian XRD dari sampel *aging* yang sebelumnya di-*solution treatment* 800°C dapat dilihat pada Gambar 4.6. Dari gambar tersebut nampak adanya *peak* yang menunjukkan adanya Cu pada sampel setelah di-*aging*. Tetapi terjadi anomali pada sampel yang di-*aging* 400° , dimana tidak terdapat *peak* Cu seperti pada sampel lainnya. Jika dilihat dari grafiknya, hasil XRD sampel *aging* 400°C juga memiliki puncak pada 2θ sekitar 43° , tetapi karena intensitasnya yang sangat rendah sehingga tidak terdeteksi sebagai salah satu *peak* tertinggi.

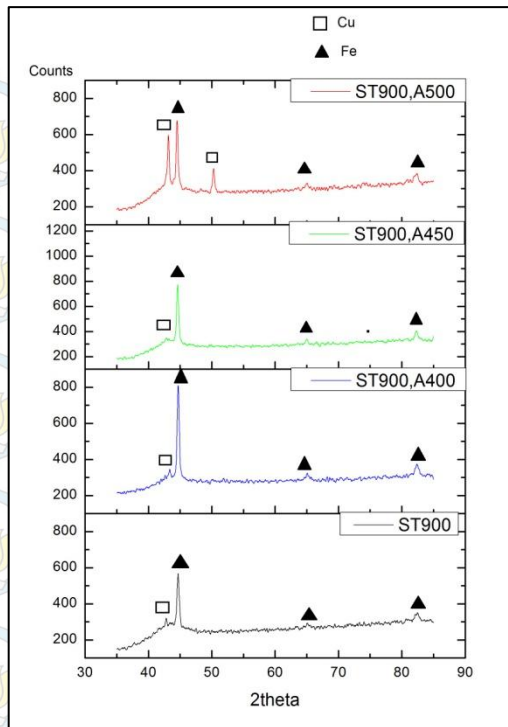
Sementara itu hasil pengujian XRD dari sampel *aging* yang sebelumnya di-*solution treatment* 900°C dapat dilihat pada Gambar 4.7. Dari gambar tersebut nampak adanya *peak* milik Cu pada keseluruhan sampel setelah di-*aging*.



Berdasarkan hasil pengujian XRD sampel setelah di-*aging* diperoleh fasa yang dominan adalah Fe- α . Hal tersebut ditunjukkan oleh *peak* dengan intensitas tertinggi pada semua sampel *aging* memiliki kesesuaian dengan *peak* milik Fe- α pada kartu PDF 87-0721. Hal tersebut juga sesuai dengan diagram fasa Fe-Cu yang menunjukkan bahwa fasa untuk paduan Fe-Cu dengan kadar Cu yang sangat rendah berupa α -ferit.



Gambar 4.6 Hasil XRD Sampel *Solution Treatment* 800°C tanpa *Aging* dan dengan *Aging* 400, 450, 500°C



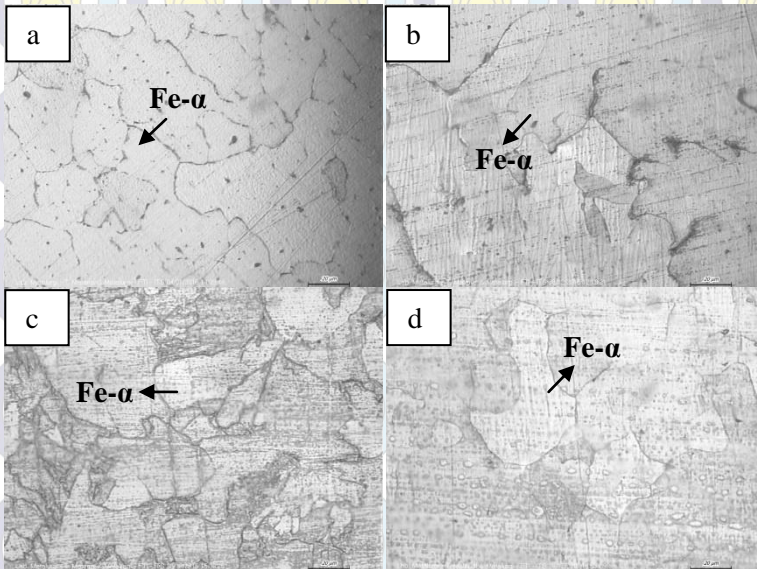
Gambar 4.7 Hasil XRD Sampel *Solution Treatment* 900°C tanpa *Aging* dan dengan *Aging* 400, 450, 500°C

4.4 Hasil Uji Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari temperatur *solution treatment* dan *aging* terhadap fasa yang terbentuk dan diameter rata-rata butir. Etsa yang dipakai yaitu Nital 2% sehingga yang terlihat adalah *general structure* dari sampel, yaitu α -ferit. Gambar 4.8 menunjukkan hasil uji metalografi dari baja AISI 1006, *copperized*-AISI 1006, dan sampel *solution treatment*. Dari gambar tersebut terlihat bahwa fasa yang terbentuk adalah α -ferit.



Gambar 4.8a menunjukkan struktur mikro dari baja AISI 1006 yang terdiri dari α -ferit. Jika dilihat pada diagram fasa Fe-Fe₃C, baja AISI 1006 dengan kandungan karbon 0,003% memang memiliki fasa berupa α -ferit. Struktur mikro *copperized*-AISI 1006 ditunjukkan oleh Gambar 4.8b dengan fasanya berupa α -ferit. Hal tersebut sesuai dengan diagram fasa Fe-Cu, dimana untuk paduan Fe-0,8% Cu fasanya adalah α -ferit.



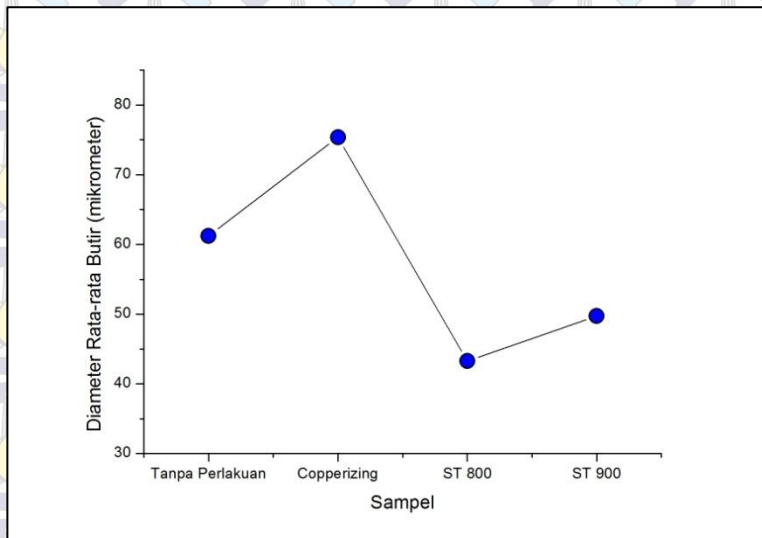
Gambar 4.7 Struktur Mikro Perbesaran 500x (a) Baja AISI 1006, (b) *Copperized*-AISI 1006 (b), dan *Solution Treatment* (c) 800°C (d) 900°C

Sampel yang telah di-*solution treatment* juga tidak mengalami perubahan fasa, yaitu tetap berupa α -ferit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8c dan 4.8d. Proses pendinginan setelah pemanasan pada *solution treatment* dilakukan secara *water quench*, tetapi tidak terbentuk martensit karena temperatur yang dipakai tidak sampai menyebabkan *solid solution* bertransformasi menjadi austenit (lihat diagram fasa Fe-Cu pada



Gambar 2.2). Struktur mikro yang terdiri dari α -ferit ini sesuai dengan hasil pengujian XRD yang menunjukkan bahwa fasa yang dominan pada baja AISI 1006, *copperized*-AISI 1006, dan sampel *solution treatment* adalah Fe- α .

Setelah dilakukan perhitungan *grain size number* (G) dengan metode *Abrams Three-Circle Intercept Procedure* (ASTM E112), diperoleh perubahan ukuran butir dari baja AISI 1006, *copperized*-AISI 1006, dan sampel *solution treatment* seperti pada Gambar 4.8. Baja AISI 1006 memiliki diameter butir rata-rata 61,23 μm . Untuk *copperized*-AISI 1006 memiliki diameter butir rata-rata 75,36 μm dan bentuk butirnya menjadi lebih pipih. Sampel *solution treatment* memiliki diameter butir rata-rata 43,28 μm dan 49,76 μm untuk temperatur 800 $^{\circ}\text{C}$ dan 900 $^{\circ}\text{C}$.



Gambar 4.8 Diameter Rata-rata Butir Baja AISI 1006, *Copperized*-AISI 1006, dan Sampel *Solution Treatment*



Pemanasan pada waktu *solution treatment* tidak mencapai temperatur austenisasi, sehingga pemanasan yang dilakukan tidak merubah fasa dari ferit ke austenit. Hal tersebut menyebabkan pertumbuhan butir dari α -ferit. Akibatnya sampel yang di-*solution treatment* dengan temperatur 900°C memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada sampel *solution treatment* 800°C . Tetapi terjadi penurunan ukuran butir dari *copperized-AISI 1006* ke sampel *solution treatment* karena adanya pengaruh dari Cu yang berdifusi masuk ke dalam baja. Dalam penelitian yang dilakukan Setuo Takaki, dkk (2004) dinyatakan bahwa ukuran butir dari ferit mengalami penurunan seiring dengan penambahan Cu ke dalam paduannya.

Pengujian metalografi juga dilakukan terhadap sampel *aging*. Gambar struktur mikro dari sampel *aging* yang divariasikan temperatur pemanasannya dapat dilihat pada Gambar 4.8. Keseluruhan sampel memiliki fasa dominan berupa α -ferit. Jika dilihat pada diagram fasa Fe-Cu, temperatur pemanasan yang dipakai dalam *aging* ini tidak menyebabkan terjadinya transformasi fasa dari ferit, sehingga struktur mikro yang didapat sesuai dengan diagram kesetimbangan Fe-Cu. Selain itu dari hasil XRD juga menunjukkan bahwa fasa yang dominan dari sampel *aging* berupa Fe- α .

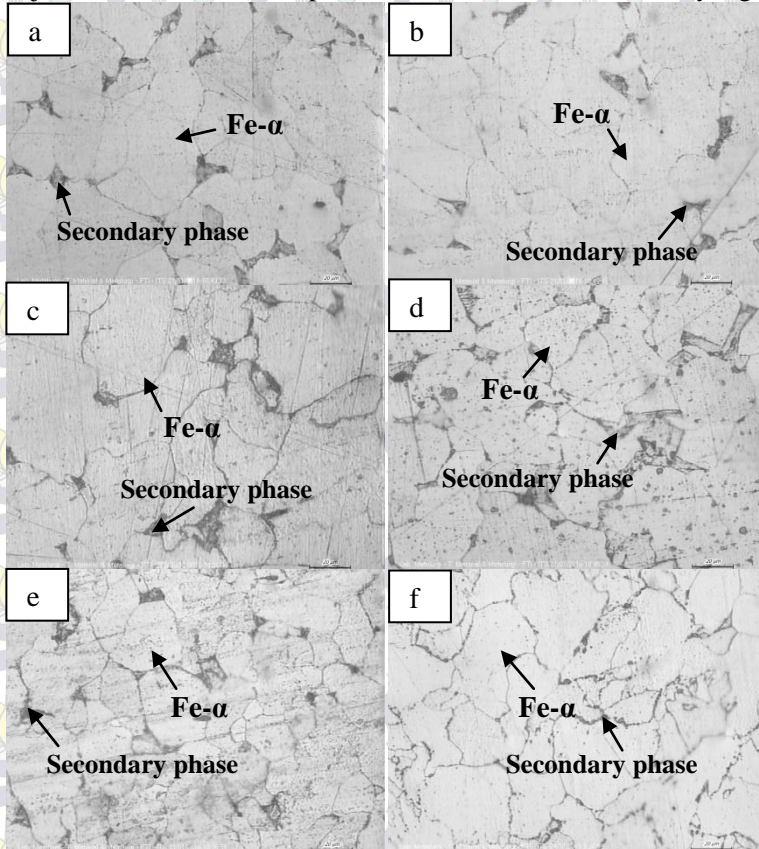
Pada sampel hasil *aging* ini terdapat perbedaan dengan sampel *solution treatment*, yaitu munculnya *secondary phase*. *Secondary phase* ini diduga merupakan unsur paduan (tembaga) yang keluar dari *supersaturated solid solution* yang terbentuk selama proses *solution treatment*.

Perhitungan diameter rata-rata butir juga dilakukan terhadap sampel *aging*. Hasil perhitungan dari diameter rata-rata butir sampel *aging* pada berbagai temperatur dapat dilihat pada Gambar 4.10. Dimana diameter rata-rata butir terkecil dimiliki oleh sampel yang di-*aging* pada temperatur 450°C untuk kedua variasi temperaur *solution treatment*.

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh diameter rata-rata butir sampel *aging* mengalami kenaikan dari sampel *solution*



treatment. Temperatur yang dipakai saat *aging* tidak menyebabkan α -ferit mengalami perubahan fasa, sehingga yang terjadi adalah mekanisme pertumbuhan butir. Suatu kristal yang

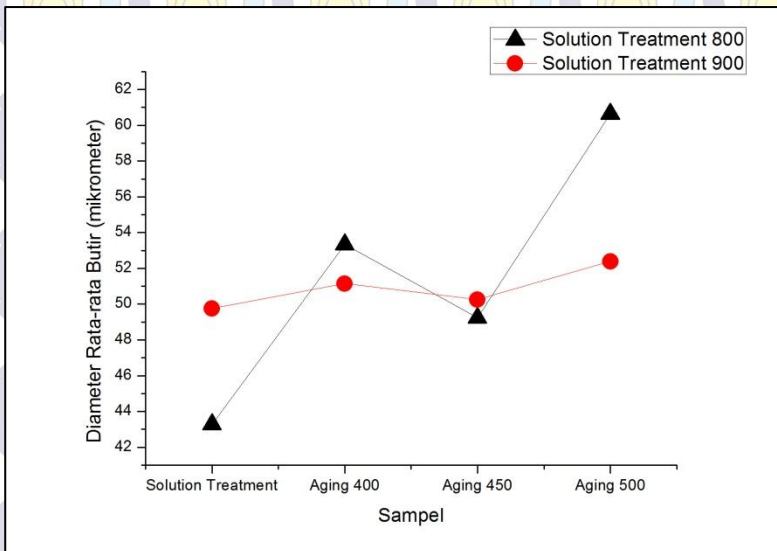


Gambar 4.9 Struktur Mikro Perbesaran 500x *Solution Treatment* 800°C dan *Aging* (a)400°C, (b)450°C, (c)500°C, *Solution Treatment* 900°C dan *Aging* (d)400°C, (e)450°C, dan (f)500°C.

dipanaskan akan mengalami pengintian dan pertumbuhan. Kristal perlu untuk tumbuh besar karena kristal yang lebih besar memiliki energi yang lebih rendah (Wahid. 2001). Pertumbuhan



butir terjadi melalui mekanisme kanibal, dimana butir yang besar memakan butiran yang kecil sampai akhirnya terbentuk butir yang kasar. Batas butir memiliki energi yang lebih tinggi dibanding butir, sehingga pengurangan batas butir akan mengurangi energi dari material. Hal ini yang menyebabkan butir yang besar tumbuh semakin besar, sedangkan butir yang kecil menyusut seakan dimakan oleh butir besar (Higgins. 1993).



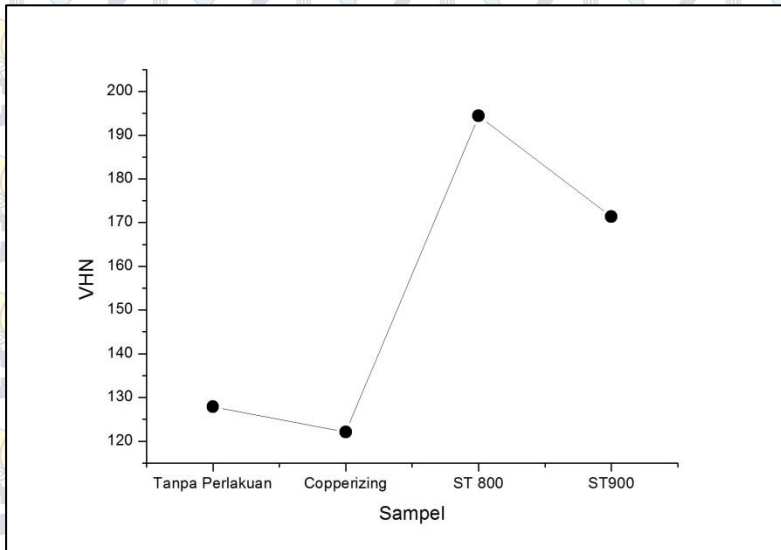
Gambar 4.10 Diameter Rata-rata Butir Sampel *Solution Treatment* dan Aging pada Berbagai Variasi Temperatur

4.5 Hasil Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dalam penelitian ini dilakukan terhadap fasa α -ferit dengan menggunakan metode *microhardness* (*microvickers*). Hasil pengujian terhadap baja AISI 1006, *copperized*-AISI 1006, dan sampel *solution treatment* dapat dilihat pada Gambar 4.9. Nilai kekerasan α -ferit mengalami penurunan dari baja AISI 1006 sebesar 127,87 VHN menjadi 122,25 VHN setelah di-*copperizing*. Penurunan yang terjadi



sebanding dengan kenaikan diameter butir rata-rata baja AISI 1006 sebelum dan sesudah di-copperizing.



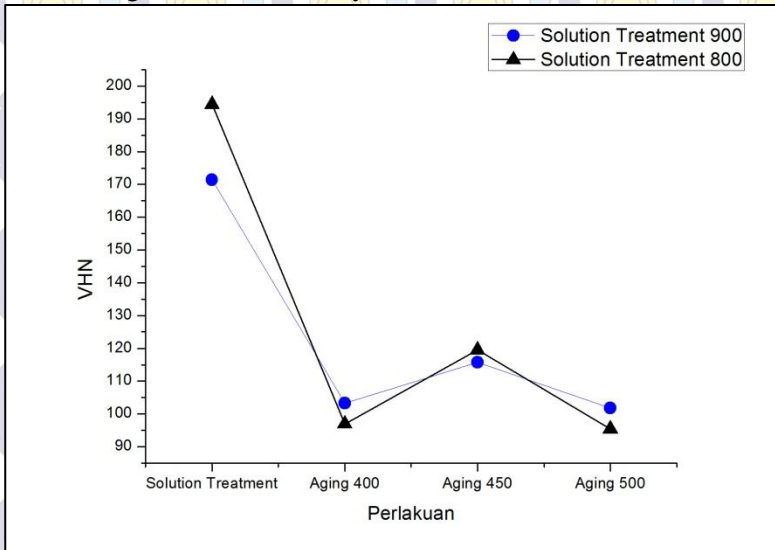
Gambar 4.11 Nilai Kekerasan Baja AISI 1006, copperized-AISI 1006, dan Sampel *Solution Treatment*.

Angka kekerasan α -ferit mengalami kenaikan setelah sampel di-*solution treatment*. Dimana sampel yang di-*solution treatment* pada temperatur 800°C memiliki nilai kekerasan sebesar 194,4 VHN dan untuk sampel *solution treatment* 900°C memiliki nilai kekerasan 171,37 VHN. Kenaikan kekerasan ini sebanding dengan penurunan diameter rata-rata butir pada kedua sampel *solution treatment*.

Pengujian kekerasan α -ferit selanjutnya dilakukan terhadap sampel *aging*. Dari hasil pengujian diperoleh penurunan kekerasan dari sampel setelah *solution treatment* dan setelah *aging*. Hal tersebut berkesinambungan dengan naiknya diameter rata-rata butir sampel *aging*. Dimana diameter rata-rata butir untuk sampel yang di-*aging* pada temperatur 450°C memiliki nilai



yang lebih kecil daripada sampel yang di-*aging* pada temperatur 400 dan 500°C. Dari hasil penelitian M. Mujahid, dkk (1997) juga diperoleh nilai kekerasan maksimum untuk baja dengan kadar karbon 0,3% yang di-*aging* pada temperatur 450°C. Meskipun angka kekerasannya lebih tinggi daripada hasil penelitian ini. Penurunan ukuran butir, yang dalam penelitian ini dilihat dari diameter rata-rata butir, menyebabkan peningkatan kekuatan material. Hal tersebut terjadi karena semakin banyak batas butir yang dimiliki oleh suatu material maka akan semakin besar energi yang dimiliki untuk menahan dislokasi saat pembebanan (Dieter, 1988.) Hal tersebut juga berlaku saat material dikenai indentasi untuk mengetahui kekerasannya (Morris, 2012).



Gambar 4.12 Nilai Kekerasan Sampel Aging

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa

1. Struktur mikro dari *copperized*-AISI 1006 yang dihasilkan setelah *solution treatment* tidak mengalami perubahan, yakni tetap terdiri dari α -ferit. Tetapi terjadi perubahan struktur mikro setelah di-*aging*, yaitu berupa α -ferit dan terbentuknya *secondary phase*.
2. Kenaikan temperatur *solution treatment* sebanding dengan kenaikan diameter butir rata-rata *copperized*-AISI 1006 dan temperatur *aging* 450°C menghasilkan diameter butir rata-rata terkecil, yaitu sebesar 49,23 μm dan 50,26 μm untuk sampel yang sebelumnya di-*solution treatment* 800 dan 900°C.
3. Temperatur *solution treatment* dan *aging* tidak berpengaruh terhadap perubahan fasa *copperized*-AISI 1006, dimana fasanya tetap berupa α -ferit.
4. Kenaikan temperatur *solution treatment* berbanding terbalik dengan nilai kekerasan dan temperatur *aging* 450°C menghasilkan nilai kekerasan tertinggi dibanding temperatur *aging* yang lain, yaitu 119, 47 VHN dan 115,75 VHN untuk sampel yang sebelumnya di-*solution treatment* 800 dan 900°C.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu

1. Memakai furnace yang temperaturnya dapat stabil pada temperatur penelitian, khususnya untuk temperatur saat *aging*.
2. Melakukan pengujian yang berskala nano karena lingkup pembahasan yang dilakukan berskala nano.







Lampiran 1

Hasil Uji Spektroskopi Baja AISI 1006

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID :	1	Material :	CARBON STEEL
Customer :	ADHA ISORI HARTATA	Dimension :	-
Lab-no. :	UJI BAHAN	Heat-no. :	-
Operator :	ELHAM	Ka. Laboratorium :	M.THORIQ WAHYUDI
Date:	3/31/2015		

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	99.5	0.0376	0.0205	0.211	0.0094	0.0089	0.0304	< 0.0050
2	99.5	0.0373	0.0199	0.208	0.0092	0.0079	0.0253	< 0.0050
3	99.5	0.0324	0.0195	0.211	0.0086	0.0072	0.0270	< 0.0050
Ave	99.5	0.0358	0.0200	0.210	0.0091	0.0080	0.0276	< 0.0050

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.0305	0.0464	< 0.0050	0.0363	0.0103	0.0096	< 0.0050	< 0.0050
2	0.0308	0.0449	< 0.0050	0.0377	0.0122	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
3	0.0294	0.0450	< 0.0050	0.0384	0.0196	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050
Ave	0.0292	0.0454	< 0.0050	0.0375	0.0140	< 0.0050	< 0.0050	< 0.0050

	Pb
1	< 0.0050
2	< 0.0050
3	< 0.0050
Ave	< 0.0050

Kampus ITS Sukolilo
Jl. Teknokratik, Malang



Lampiran 2

Hasil Spektroskopi *Copperized-AISI 1006*

BORATORIUM DT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : 5N

Material :

Customer :

Dimension :

Lab-no. :

Heat-no. :

Operator :

Ka. Laboratorium :

Date :

Spektralanalyse Foundry-MASTER

Grade :

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
99.4	0.0735	0.0221	0.214	0.0139	0.0091	0.0301
99.4	0.0689	0.0194	0.219	0.0141	0.0085	0.0302
99.4	0.0738	0.0174	0.222	0.0145	0.0093	0.0308
99.4	0.0721	0.0196	0.218	0.0142	0.0090	0.0304
Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V
0.0263	0.0459	< 0.0005	0.0965	0.0135	0.0015	0.0018
0.0261	0.0451	< 0.0005	0.0799	0.0118	< 0.0010	0.0020
0.0267	0.0464	< 0.0005	0.0817	0.0014	0.0019	0.0039
0.0264	0.0458	< 0.0005	0.0860	0.0089	0.0014	0.0026
Pb	Sn	B	Ca	Zr	Zn	Bi
0.0018	0.0014	0.0001	0.0006	0.0081	< 0.0001	0.0026
< 0.0010	0.0007	0.0003	0.0004	0.0084	0.0007	0.0028
< 0.0010	0.0005	< 0.0001	0.0004	0.0078	< 0.0001	0.0027
0.0012	0.0009	0.0002	0.0005	0.0081	0.0002	0.0027
N	Se	Sb	Ta			
< 0.0030	0.0037	0.0035	< 0.0040			
< 0.0030	0.0041	< 0.0010	0.0102			
< 0.0030	0.0034	0.0088	0.0135			
< 0.0030	0.0037	0.0041	0.0083			



Lampiran 3

Hasil XRD

1. Hasil XRD baja AISI 1006

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.6563	487.49	0.0836	2.02926	100.00
64.9553	68.47	0.2007	1.43572	14.04
82.3476	73.89	0.5353	1.17102	15.16

2. Hasil XRD *Copperized-AISI 1006*

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.1936	9.85	0.2676	8.67797	1.68
44.6594	585.40	0.2342	2.02913	100.00
64.9733	92.37	0.2676	1.43536	15.78
82.2498	124.25	0.3346	1.17217	21.22



3. Hasil XRD Solution Treatment 800°C

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.9228	58.97	0.6691	2.10711	11.00
44.5398	535.97	0.1338	2.03429	100.00
65.1076	17.08	0.8029	1.43273	3.19
82.2994	42.60	0.5353	1.17159	7.95

4. Hasil XRD Solution Treatment 900°C

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.8147	63.37	0.2007	2.11218	22.50
44.7602	281.60	0.2342	2.02479	100.00
65.0467	18.52	0.8029	1.43392	6.58
82.3742	35.08	0.6691	1.17071	12.46

5. Hasil XRD Solution Treatment 800°C dan Aging 400°C

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
45.0321	347.96	0.2676	2.01319	100.00
65.3754	25.20	0.5353	1.42750	7.24
82.6127	105.49	0.2007	1.16794	30.32



6. Hasil XRD Solution Treatment 800°C dan Aging 450°C

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.4500	9.23	0.8029	8.46561	1.10
25.6335	5.77	0.4684	3.47529	0.69
43.3159	91.57	0.1673	2.08889	10.91
44.6315	839.24	0.1004	2.03033	100.00
64.9850	64.96	0.2676	1.43513	7.74
82.4022	105.57	0.2676	1.17038	12.58

7. Hasil XRD Solution Treatment 800°C dan Aging 500°C

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
35.3782	13.99	0.8029	2.53721	3.60
43.3292	207.39	0.1338	2.08828	53.36
44.7018	388.64	0.1004	2.02730	100.00
50.5260	52.58	0.4015	1.80643	13.53
64.9343	17.56	0.8029	1.43613	4.52
82.3398	58.61	0.5353	1.17111	15.08



8. Hasil XRD *Solution Treatment* 900°C dan Aging 400°C

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.3825	56.22	0.2007	2.08584	10.40
44.7070	540.72	0.3346	2.02707	100.00
65.1373	29.18	0.8029	1.43214	5.40
82.3882	62.20	0.5353	1.17055	11.50

9. Hasil XRD *Solution Treatment* 900°C dan Aging 450°C

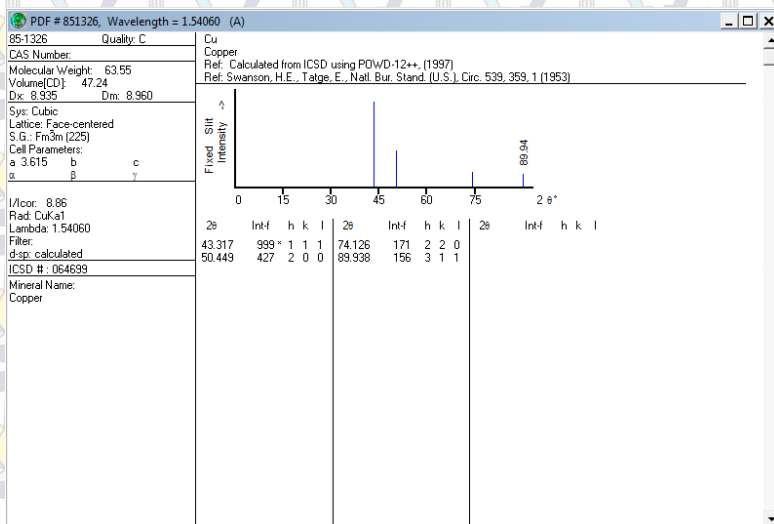
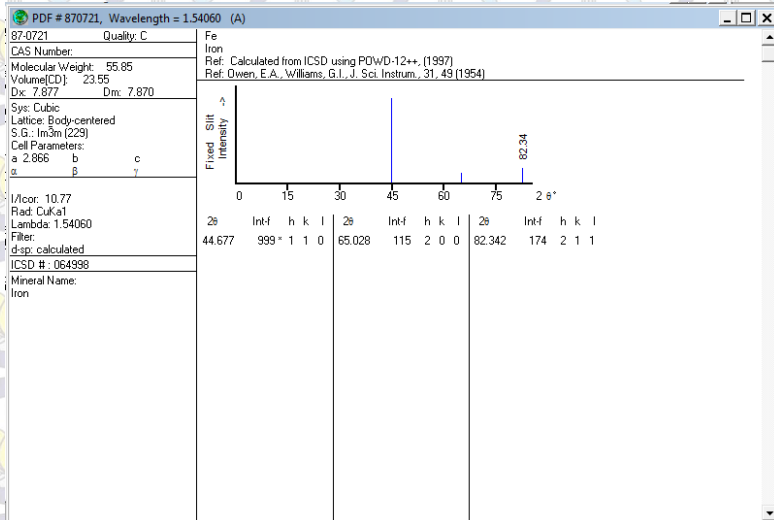
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.8462	53.10	0.8029	2.11070	10.60
44.5979	501.09	0.2342	2.03178	100.00
65.0358	29.34	0.4015	1.43413	5.86
82.3600	63.25	0.3346	1.17088	12.62

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10.3076	13.20	0.5353	8.58224	3.41
43.1379	341.41	0.0836	2.09710	88.12
44.5088	387.43	0.2342	2.03564	100.00
50.2387	144.51	0.1004	1.81609	37.30
64.9847	28.13	0.8029	1.43514	7.26
82.3581	43.61	0.6691	1.17090	11.26



Lampiran 4

PDF Card





Lampiran 5

Perhitungan Ukuran Butir Rata-rata

$L = 500 \text{ mm}$

$M = 500\times$

Keterangan:

P_i = Jumlah perpotongan batas butir dengan tiga lingkaran

M = Perbesaran gambar

L = Keliling tiga lingkaran

- Menghitung P_L

$$P_L = \frac{P_i \times M}{L}$$

- Menghitung ℓ

$$\ell = \frac{1}{P_L}$$

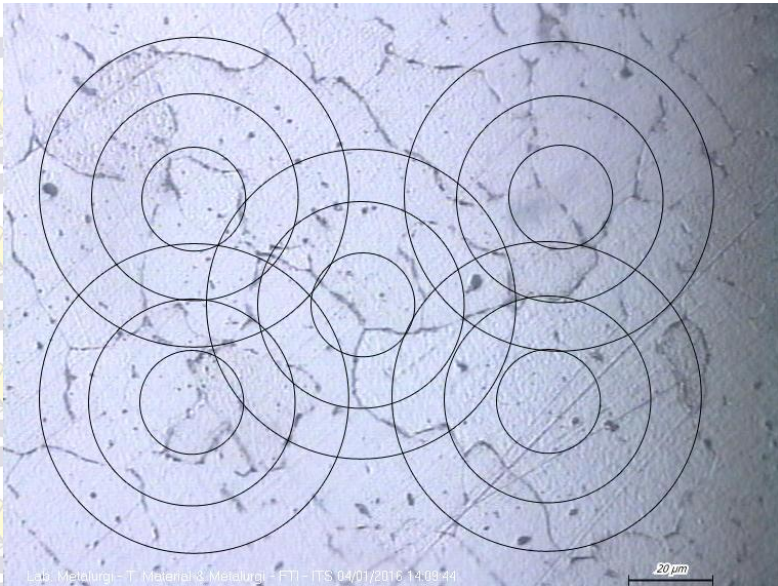
- Menentukan Nilai ASTM *Grain Size* (G)

$$G = \{-6,643856 (\log_{10} \ell) - 3,288\}$$

- Menghitung diameter rata-rata dengan interpolasi (referensi pada Tabel 11)



1. AISI 1006



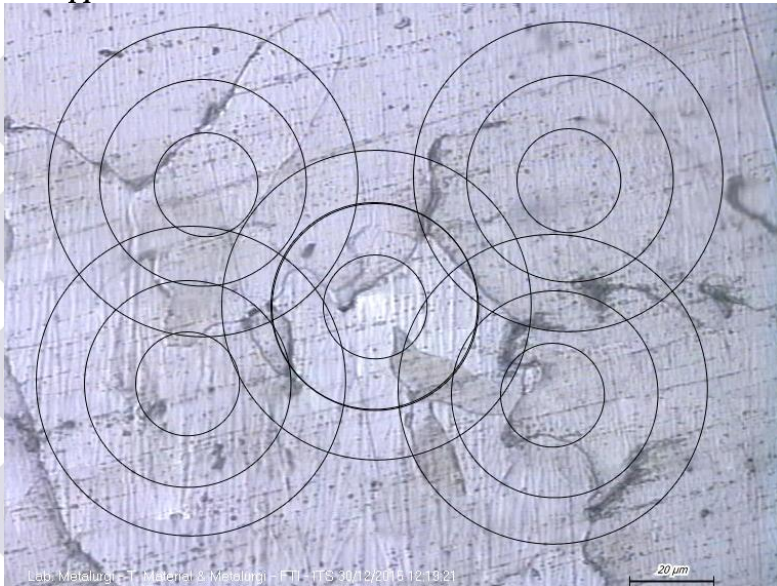
Gambar 1 Struktur Mikro Baja AISI 1006 Perbesaran 500x

Tabel 1 Perhitungan *Grain Size* Baja AISI 1006

Pi	PL	ϵ	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
17	17,0000	0,058824	4,8792	61,2275	61,23
17	17,0000	0,058824	4,8792		
20	20,0000	0,05	5,3483		
23	23,0000	0,043478	5,7516		
16	16,0000	0,0625	4,7042		



2. Copperized-AISI 1006



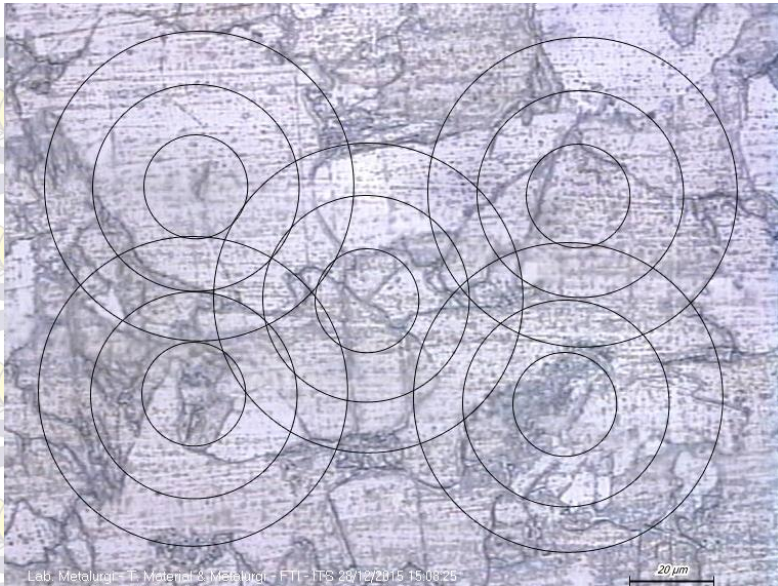
Gambar 2 Struktur Mikro *Copperized-AISI 1006*
Perbesaran 500x

Tabel 1 Perhitungan *Grain Size Copperized-AISI 1006*

Pi	PL	ϵ	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
17	17,0000	0,058824	4,8869	4,5056	75,36
9	9,0000	0,111111	3,0436		
19	19,0000	0,052632	5,2002		
15	15,0000	0,066667	4,5179		
17	17,0000	0,058824	4,8792		



3. Solution Treatment 800°C



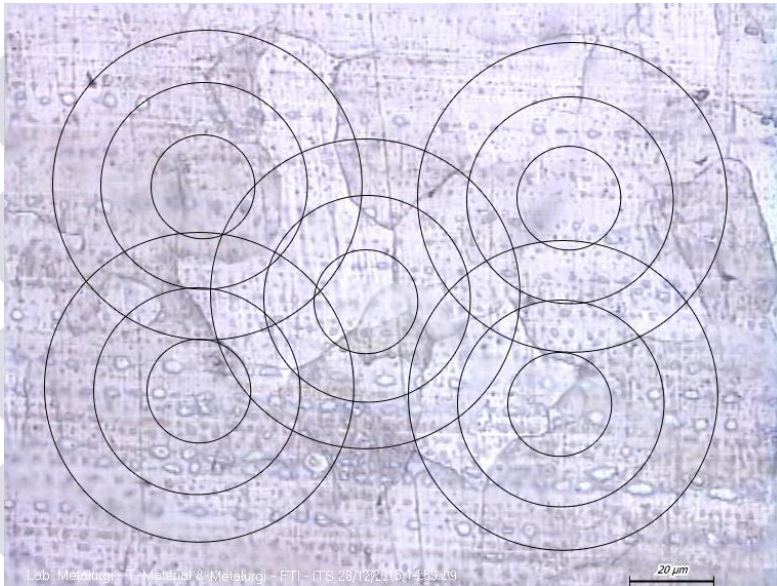
Gambar 3 Struktur Mikro Sampel *Solution Treatment* 800°C Perbesaran 500x

Tabel 3 Perhitungan *Grain Size Solution Treatment* 800°C

Pi	PL	Σ	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
30	30,0000	0,0333	6,5185	6,1139	43,28
26	26,0000	0,0385	6,1055		
23	23,0000	0,0435	5,7516		
24	24,0000	0,0417	5,8745		
28	28,0000	0,0357	6,3194		



4. *Solution Treatment 900°C*



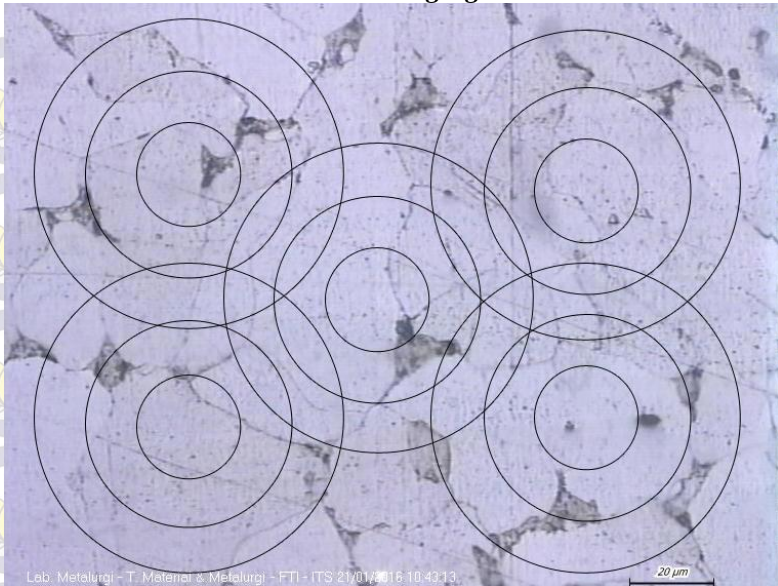
Gambar 4 Struktur Mikro Sampel *Solution Treatment* 900°C Perbesaran 500x

Tabel 4 Perhitungan *Grain Size Solution Treatment* 900°C

Pi	PL	ϵ	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
19	19,0000	0,0526	5,2002	5,6803	49,76
22	22,0000	0,0455	5,6233		
21	21,0000	0,0476	5,4891		
24	24,0000	0,0417	5,8745		
27	27,0000	0,0370	6,2144		



5. *Solution treatment 800°C dan Aging 400°C*



Lab: Metalurgi - T. Material & Metalurgi - FTI - ITS 21/01/2016 16.43.13

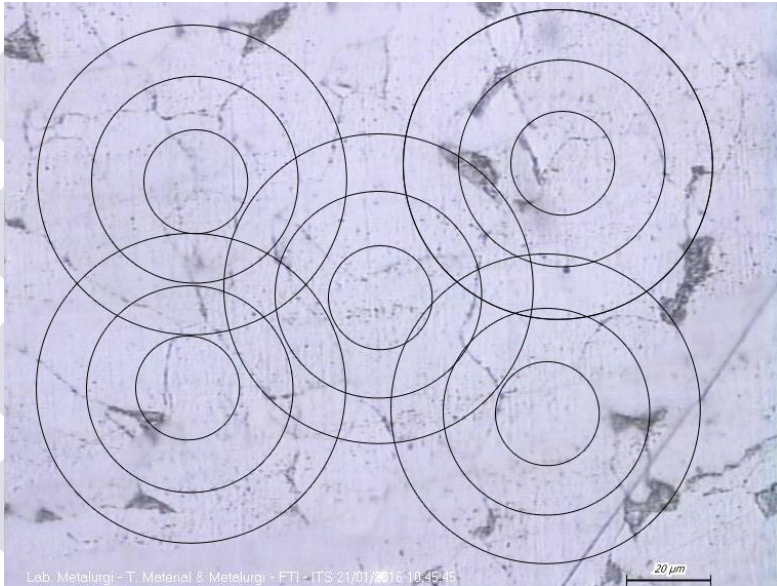
Gambar 5 Struktur Mikro Sampel *Solution Treatment 800°C dan Aging 400°C* Perbesaran 500x

Tabel 5 Perhitungan *Grain Size Solution Treatment 800°C dan Aging 400°C*

Pi	PL	ϕ	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
24	24,0000	0,0417	5,8745	5,5027	53,35
22	22,0000	0,0455	5,6233		
20	20,0000	0,0500	5,3483		
22	22,0000	0,0455	5,6233		
18	18,0000	0,0556	5,0442		



6. *Solution treatment 800°C dan Aging 450°C*



Lab. Metalurgi - T. Material & Metalurgi - FTI - ITS 21/01/2016 10:45:45

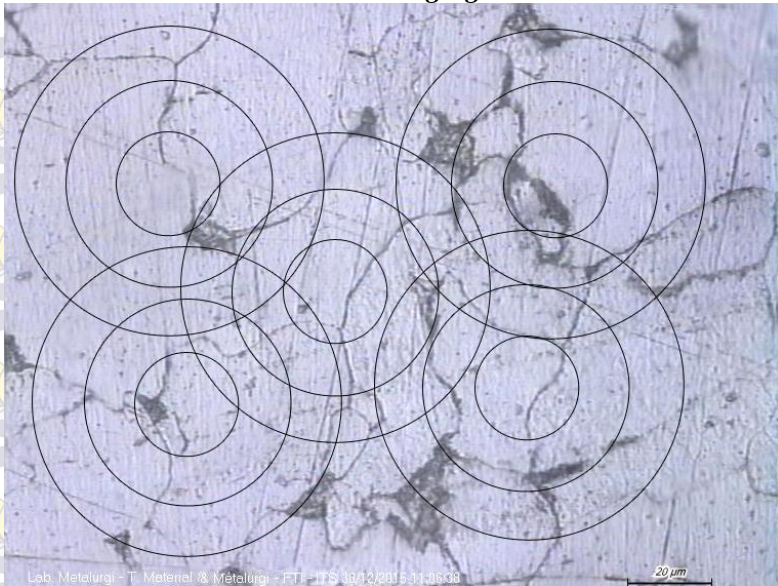
Gambar 6 Struktur Mikro *Solution Treatment 800°C dan Aging 450°C* Perbesaran 500x

Tabel 6 Perhitungan *Grain Size Solution Treatment 800°C dan Aging 450°C*

Pi	PL	Σ	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
28	28,0000	0,0357	6,3194	5,7063	49,23
23	23,0000	0,0435	5,7516		
21	21,0000	0,0476	5,4891		
20	20,0000	0,0500	5,3483		
22	22,0000	0,0455	5,6233		



7. *Solution treatment 800°C dan Aging 500°C*



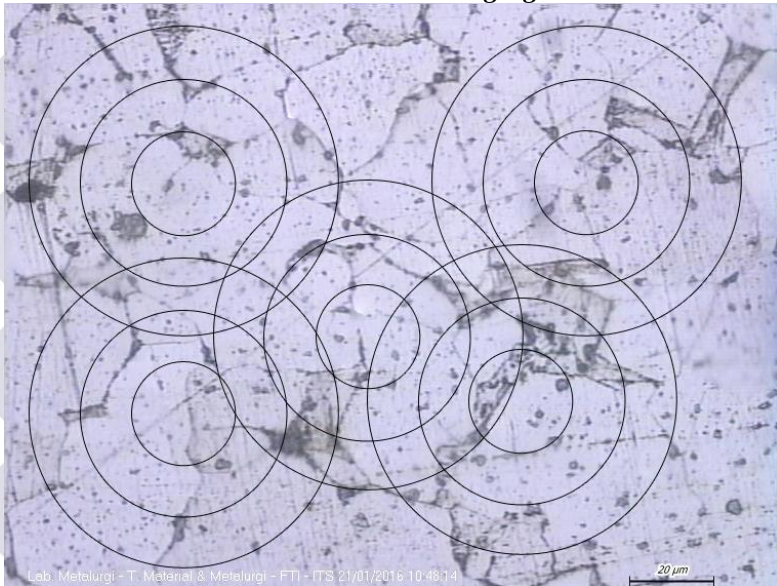
Gambar 7 Struktur Mikro Sampel *Solution Treatment* 800°C Dan Aging 500°C Perbesaran 500x

Tabel 7 Perhitungan *Grain Size Solution Treatment* 800°C dan Aging 500°C

Pi	PL	ϕ	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
11	11,0000	0,0909	3,6228	5,1414	60,64
20	20,0000	0,0500	5,3483		
22	22,0000	0,0455	5,6233		
21	21,0000	0,0476	5,4891		
22	22,0000	0,0455	5,6233		



8. *Solution treatment 900°C dan Aging 400°C*



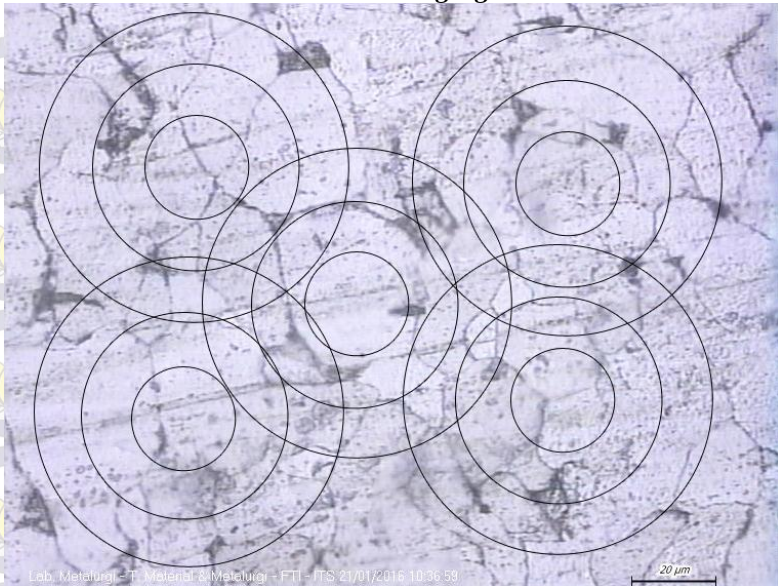
Gambar 8 Struktur Mikro Sampel *Solution Treatment 900°C dan Aging 400°C* Perbesaran 500x

Tabel 8 Perhitungan *Grain Size Solution Treatment 900°C dan Aging 400°C*

Pi	PL	ϕ	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
23	23,0000	0,0435	5,7516	5,6324	51,15
14	14,0000	0,0714	4,3188		
23	23,0000	0,0435	5,7516		
26	26,0000	0,0385	6,1055		
24	24,0000	0,0417	5,8745		



9. *Solution Treatment 900°C dan Aging 450°C*



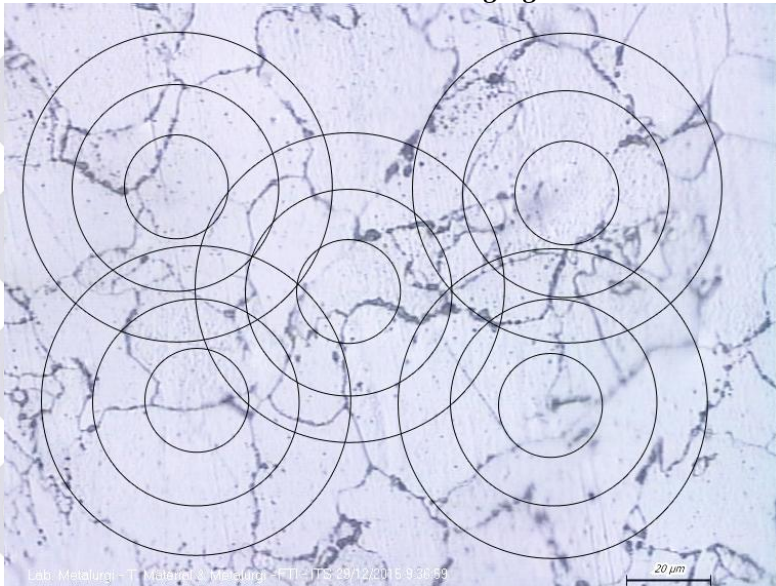
Gambar 9 Struktur Mikro Sampel *Solution Treatment 900°C dan Aging 450°C* Perbesaran 500x

Tabel 9 Perhitungan *Grain Size Solution Treatment 900°C dan Aging 450°C*

Pi	PL	ϕ	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
25	25,0000	0,0400	5,9923	5,6848	50,26
20	20,0000	0,0500	5,3483		
21	21,0000	0,0476	5,4891		
26	26,0000	0,0385	6,1055		
21	21,0000	0,0476	5,4891		



10. *Solution treatment 900°C dan Aging 500°C*



Gambar 10 Struktur Mikro Sampel *Solution Treatment 900°C dan Aging 500°C* Perbesaran 500x

Tabel 10 Perhitungan *Grain Size Solution Treatment 900°C dan Aging 500°C*

Pi	PL	ϕ	G	G Rata-rata	d Rata-rata(μm)
20	20,0000	0,0500	5,3483	5,5602	52,38
22	22,0000	0,0455	5,6233		
25	25,0000	0,0400	5,9923		
21	21,0000	0,0476	5,4891		
20	20,0000	0,0500	5,3483		

**Tabel 11 Hubungan Ukuran Butir (ASTM E112)****TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains**

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area mm^2	\bar{d} Average Diameter μm	$\bar{\tau}$ Mean Intercept μm	\bar{N}_L No./mm
	No./in. ² at 100X	No./mm ² at 1X				
00	0.25	3.88	0.2581	0.5080	0.4525	452.5
0	0.50	7.75	0.1290	0.3592	0.3200	320.0
0.5	0.75	10.96	0.0912	0.3021	0.2691	269.1
1.0	1.00	15.50	0.0645	0.2540	0.2263	226.3
1.5	1.41	21.92	0.0456	0.2136	0.1903	190.3
2.0	2.00	31.00	0.0323	0.1796	0.1600	160.0
2.5	2.83	43.84	0.0228	0.1510	0.1345	134.5
3.0	4.00	62.00	0.0161	0.1270	0.1131	113.1
3.5	5.66	87.68	0.0114	0.1068	0.0951	95.1
4.0	8.00	124.00	0.00806	0.0898	0.0800	80.0
4.5	11.31	175.36	0.00570	0.0755	0.0673	67.3
5.0	16.00	248.00	0.00403	0.0635	0.0566	56.6
5.5	22.63	350.73	0.00285	0.0534	0.0476	47.6
6.0	32.00	496.00	0.00202	0.0449	0.0400	40.0
6.5	45.25	701.45	0.00143	0.0378	0.0336	33.6
7.0	64.00	992.00	0.00101	0.0318	0.0283	28.3
7.5	90.51	1402.9	0.00071	0.0267	0.0238	23.8
8.0	128.00	1984.0	0.00050	0.0225	0.0200	20.0
8.5	181.02	2805.8	0.00036	0.0189	0.0168	16.8
9.0	256.00	3968.0	0.00025	0.0159	0.0141	14.1
9.5	362.04	5611.6	0.00018	0.0133	0.0119	11.9
10.0	512.00	7936.0	0.00013	0.0112	0.0100	10.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	0.0094	0.0084	8.4
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	0.0079	0.0071	7.1
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	0.0067	0.0060	5.9
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	0.0056	0.0050	5.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	0.0047	0.0042	4.2
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	0.0040	0.0035	3.5
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	0.0033	0.0030	3.0
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	0.0028	0.0025	2.5



Lampiran 6

Hasil Uji Kekerasan

Tabel 12 Hasil Uji Kekerasan

Sampel	$d_1(\mu\text{m})$	$d_2(\mu\text{m})$	VHN	Rata-rata VHN
Tanpa Perlakuan	121	128,2	119,4	127,87
	121,01	122,52	125,1	
	114,59	116,3	139,1	
Copperizing	118,89	119,83	130,2	122,13
	125,7	125,69	117,4	
	123,71	126,19	118,8	
ST 800°C	99,79	101,61	182,9	194,40
	95,35	98,23	197,9	
	97,29	94,15	202,4	
ST 900°C	111,87	118,32	140	171,37
	100,44	100,36	184	
	96,26	101,2	190,1	
ST 800°C, Aging 400°C	143,23	139,62	92,7	96,90
	136,87	136,87	99	
	137,23	134,17	99	
ST 800°C, Aging 450°C	124,89	130,63	113,6	119,47
	127,82	125,04	116	
	119,01	121,01	128,8	
ST 800°C, Aging 500°C	145,73	138,39	91,9	95,37
	139,28	139,61	95,4	
	136,46	137,52	98,8	



Tabel 2 Hasil Uji Kekerasan(lanjutan)

Sampel	d ₁ (μm)	d ₂ (μm)	VHN	Rata-rata VHN
ST 900°C, <i>Aging</i> 400°C	133,72	135,51	102,3	103,27
	130,3	138,77	102,5	
	132,29	133,52	105	
ST 900°C, <i>Aging</i> 450°C	125,7	124,91	118,85	115,75
	126,89	126,34	116,18	
	129,56	127,54	112,22	
ST 900°C, <i>Aging</i> 500°C	134,27	135,61	101,8	101,73
	135,02	134,42	102,2	
	134,79	135,95	101,2	

Rumus HVN

$$HVN = \frac{1.854,4 P}{d^2}$$

dimana,

P = gaya yang diberikan (1000gf)

d = diagonal rata-rata (μm)



DAFTAR PUSTAKA

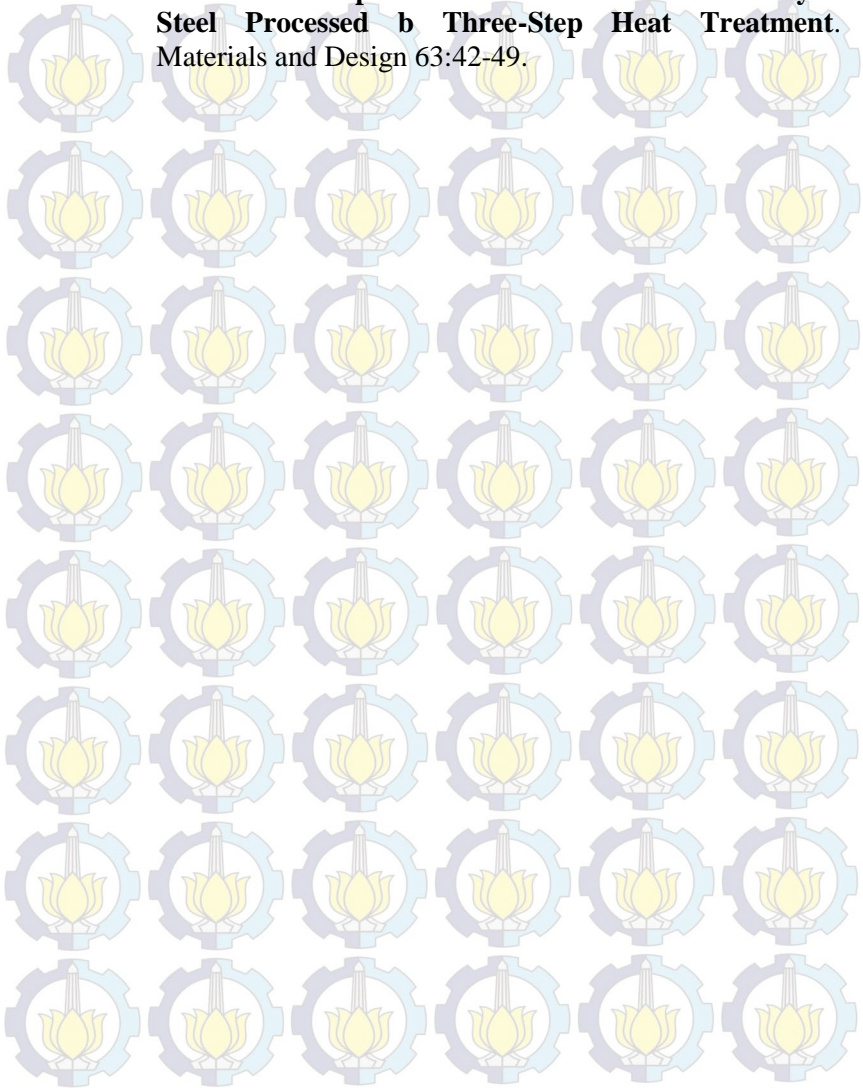
- _____. 1990. **ASM Metals Handbook Vol 1 10th Edition: Properties and Selection Irons, Steels, and High Performance Alloys**. Ohio: ASM International.
- _____. 1992. **ASM Metals Handbook Vol 2 10th Edition: Properties and Selection Non-Ferrous Alloys and Special Purpose Mate**. Ohio: ASM International.
- Bondan, T. Sofyan. 2010. **Pengantar Teknik Material**. Jakarta: Salemba Teknika.
- Callister, William D., dan David G. Rethwisch. 2000. **Material Science and Engineering and Introduction**. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Dieter, G. E. 1997. **Introduction to Physical Metallurgy 2nd Edition**. New Delhi: McGraw Hill.
- Elwazri, dkk. 2007. **Analysis of Copper Effect on Microstructure and Mechanical Properties in Microalloyed Steels**. ISIJ Internasional, 48: 107-113.
- Habashi, Fathi. 1997. **Handbook of Extractive Metallurgy Vol 2: Primary Metals, Secondary Metals, Light Metals**. Jerman: Wiley-VCH.
- Higgins, Raymond A. 1993. **Engineering Metallurgy Part 1 Applied Physical Metallurgy Sixth Edition**. Britain: Arrowsmith Ltd.
- Kishida, Koji. 1995. **Copper-Bearing High-Strength Sheet Steels**. Nippon Steel Technical Report No. 64.
- Marucci, M.L., dan Hanejko, F.G. 2011. **Effect of Copper Alloy Addition Method on the Dimensional Response of Sintered Fe-Cu-C Steels**. Cinnaminson, NJ: Hoeganaes Corporation.
- F. Molleda, J. **Copper Coating of Carbon Steel By A Furnace Brazing Process Using Brass As The Braze**. Material Characterization 59, 5: 613-617.
- Moline, K., dkk. 2002. **Effect of Copper in High Strength Low Alloy Steel**. Colorado: School Of Mines.

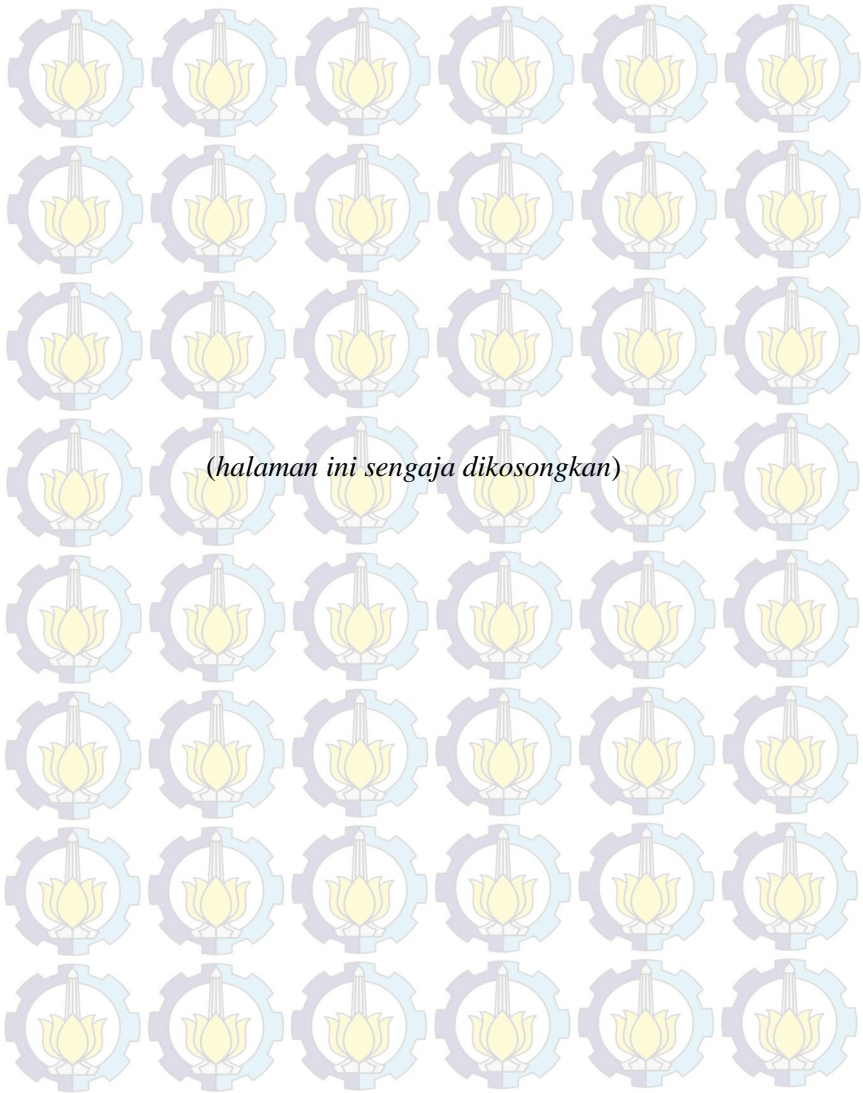


- Morris, J.W. 2012. **The Influence of Grain Size on Mechanical Properties of Steel**. <URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/861397/>>
- Mujahid, M., dkk. 1997. **HSLA-100 Steels: Influence of Aging Heat Treatment on Microstructure and Properties**. Ohio: ASM International.
- Porter, D.A., dan K.E. Easterling. 1992. **Phase Transformation in Metals and Alloys 2nd Edition**. India: Chapman & Hall.
- Ren, Hui-Ping, Hai-Yan Wang, dan Zong-Chang Liu. 2007. **Cu Precipitation Dynamics in Fe-Cu Alloy**. Journal of Physics.
- Savage, W., Nippes, E., dan Stanton, R. 1978. **Intergranular Attack Of Steel by Molten Copper**. Welding Research Supplement.
- Sekunowo, Olatunde I, Stephen I. Durowaye, dan Oluwashina P. Gbenedor. 2014. **Effect of Copper on Microstructure and Mechanical Properties of Construction Steel**. International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering 8, 8: 839-843.
- Suherman, Wahid. 2003. **Ilmu Logam I**. Surabaya: ITS.
- Suherman, Wahid. 2001. **Perlakuan Panas**. Surabaya: ITS.
- Takaki, Setuo, dkk. 2004. **Effect of Copper on Tensile Properties and Grain-Refinement of Steel and its Relation to Precipitation Behaviour**. Materials Transactions 45, 7: 2239-2244.
- Taufiq, Tania, dan Akhmad A. Korda. 2010. **Studi Pengaruh Temperatur Aging dan Orientasi Butiran Terhadap Sifat Mekanik Paduan Al 2014**. JTM XVII, 3:161-170.
- Totten, George. E. 2006. **Steel Heat Treatment Handbook 2nd Edition**. New York: Taylor&Francis.
- Xu, Yourong., dkk. 1993. **Diffusion Behaviour of Fe-Cu Interface of Copper Brazed Double-wall Steel Tubes**. Material Science Technology 9: 279-282.



Zhou, W.H., dkk. 2014. **Copper Precipitation and its Impact on Mechanical Properties in A Low Carbon Microalloyed Steel Processed b Three-Step Heat Treatment.** Materials and Design 63:42-49.





BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Widia Anggia Vicky. Dilahirkan di Nganjuk pada tanggal 24 Juli 1994. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Banaran Kulon III, SDN Banaran Kulon I, SMPN 1 Nganjuk, dan SMAN 2 Nganjuk. Lulus Sekolah Menengah Atas pada tahun 2012, penulis melanjutkan pendidikannya di salah satu perguruan tinggi di Indonesia, mengambil bidang Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif sebagai staff Departemen Dalam Negeri HMMT FTI-ITS (2013-2014), Bendahara Umum HMMT FTI-ITS (2014-2015), Bendahara Kemangi 2015, dan Senat Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (2015-2016). Selain itu penulis juga aktif sebagai Grader Metalurgi I dan II serta Asisten Dosen WTKI. Semasa kuliah penulis juga melakukan kegiatan *On the Job Training* di PG Lestari. Dan kegiatan perkuliahannya diakhiri dengan melakukan penelitian yang dijadikan Tugas Akhir dengan judul **“Pengaruh Temperatur *Solution Treatment* dan *Aging* terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan *Copperized-AISI 1006*”.**

email: anggiapiki@gmail.com

